

---

# ТЕХНИКА ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Методические указания к практическим занятиям

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

## **ТЕХНИКА ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Методические указания к практическим занятиям

*Рекомендовано методическим советом УрФУ  
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки  
241000 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы  
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»,  
280201 «Охрана окружающей среды  
и рациональное использование природных ресурсов»*

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2014

УДК [628.511+628.54] (075.8)

Составители: Е. Г. Золотарева, В. Д. Глянченко

Научный редактор – доц., канд. хим. наук М. Г. Шишов

**Техника защиты окружающей среды** : методические указания к практическим занятиям / сост. Е. Г. Золотарева, В. Д. Глянченко. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 64 с.

Методические указания к практическим занятиям по курсу «Техника защиты окружающей среды» содержат примеры решения задач по расчету основных узлов и схем оборудования для улавливания и обезвреживания вредных компонентов из газообразных выбросов, сточных вод и твердых отходов промышленных предприятий, а также утилизации отходов различных технологий и бытовых отходов.

Библиогр.: 26 назв. Табл. 7. Рис. 1.

Подготовлено кафедрой «Химическая технология топлива и промышленная экология».

© Уральский федеральный  
университет, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОЧИСТКА ОТ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ .....	5
1.1. Очистка газов в сухих инерционных пылеуловителях .....	6
1.2. Очистка газов в мокрых инерционных пылеуловителях .....	12
1.3. Очистка газов в пористых фильтрах .....	25
1.4. Электрическая очистка газов .....	28
2. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ .....	31
2.1. Очистка сточных вод отстаиванием .....	32
2.2. Очистка сточных вод фильтрованием .....	36
2.3. Очистка сточных вод флотацией .....	40
2.4. Очистка сточных вод физико-химическими методами (ионный обмен и кристаллизация) .....	43
2.5. Очистка сточных вод биохимическими методами .....	46
3. УТИЛИЗАЦИЯ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ .....	49
3.1. Агломерация .....	50
3.2. Сжигание бытовых отходов .....	54
3.3. Захоронение твердых бытовых отходов .....	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	61

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержат примеры решения задач, составленных применительно к решению проблем, возникающих на предприятиях химико-металлургического комплекса, связанных с обеспечением современных требований повышения экологичности этих производств, снижения уровня вредных стоков и выбросов в окружающую среду.

Именно промышленность является на сегодняшний день одним из основных источников загрязнения окружающей среды. Причем в наибольшей степени такими источниками становятся относительно старые предприятия и производства, построенные еще в то время, когда вопросам экологии не уделялось должного внимания. Поэтому они не имеют необходимого количества современных устройств по очистке вредных стоков и выбросов. Кроме того, неизбежен процесс старения оборудования, снижения его коэффициента полезного действия.

Современный инженер обязан в должной степени овладеть техникой расчетов современного очистного и улавливающего оборудования, уметь сравнивать эффективность действия аппаратов различной конструкции в целях выбора наиболее оптимального эколого-экономического варианта для данного производства. Студенты, прослушавшие курсы «Техника защиты окружающей среды», «Процессы и аппараты химической технологии», «Промышленная экология», должны уметь использовать полученные знания для решения практических задач, приведенных в предлагаемой работе.

Конечной целью каждого решения должно быть доказательство того, что именно такое конструктивное решение дает возможность достижения нормативных ПДК, ПДВ, ПДС и других нормативных показателей, обеспечивающих экологичность данного химического производства.

В процессе проведения практических занятий преподаватель может варьировать исходные данные поставленных задач и привязывать эти задачи к конкретным химическим производствам.

В указаниях представлен список учебной литературы для студентов специальностей 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» и 241000 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», изучающих курс «Техника защиты

окружающей среды» и прослушавших курсы общих дисциплин («Процессы и аппараты химической технологии», «Промышленная экология», «Техника защиты окружающей среды» и т. п.).

Для лучшего усвоения принципов решения задач используется ручной метод расчета аппаратуры, но при этом студент должен помнить, что разработаны компьютерные программы расчета аппаратуры, однако эти программы можно будет использовать при выполнении последующих курсовых и дипломных работ.

## **1. ОЧИСТКА ОТ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ**

Для улавливания из газа пыли или отдельных газообразных компонентов в зависимости от их свойств и свойств очищаемого газа используют разные по конструкции и принципу действия аппараты. Аппараты, эксплуатирующиеся в настоящее время, могут осуществлять очистку сухих газов или орошаемых жидкостью. Первые аппараты принято называть «сухими», вторые – «мокрыми». В мокрых аппаратах пыль смачивается, ее масса становится больше, и она отделяется от газа под действием инерционных сил или захватывается жидкостью и выводится из аппарата.

Аппараты газоочистки можно классифицировать по принципу действия и области применения. По принципу действия эти аппараты подразделяют на следующие группы:

1. Инерционные пылеуловители. В этих пылеуловителях эффект очистки газа от пыли достигается в результате использования инерционных сил, в том числе центробежных. К ним относятся: пылесадительные камеры и коллекторы, жалюзийные пылеотделители, пылеуловители и брызгоуловители инерционного действия (пылевые мешки), сухие и мокрые центробежные циклоны, центробежные пылеуловители машинного типа, статические газопромыватели, барботажные и пенные аппараты, скоростные пылеуловители с трубами Вентури.

2. Пористые фильтры. В аппаратах этой группы пылезадержание осуществляется при пропускании газов через пористые материалы. К ним относятся промышленные фильтры: тканевые, кассетные, с насыпным слоем зернистого материала, из пористой пластмассы, керамики, металлокерамики и других материалов; фильтры тонкой очистки (волоконистые); фильтры для очистки атмосферного воздуха

(сетчатые фильтры). Используются тканевые фильтры, особенно в системах общеобменной и местной вентиляции.

3. Электрофильтры. В этих аппаратах газ пропускается через электрическое поле высокого напряжения. В результате этого он ионизируется, заряжает содержащиеся в газе частицы пыли или капельки жидкости, которые осаждаются на электроде электрофильтра. Аппараты могут быть мокрыми и сухими и делятся на однозонные и двухзонные – сухие горизонтальные и сухие вертикальные, мокрые электрофильтры. Применяются для очистки дымовых газов и газов энергетических котлов.

При расчете поставленной задачи определяются размеры аппаратов, их гидравлическое сопротивление и диаметр наименьшей улавливаемой частицы.

### **1.1. Очистка газов в сухих инерционных пылеуловителях**

Движущаяся частица пыли обладает инерцией:

$$A_{\text{ин}} = \frac{m_{\text{ч}} \cdot \omega^2}{2},$$

где  $A_{\text{ин}}$  – сила, действующая на частицу;

$m_{\text{ч}}$  – масса частицы;

$\omega$  – скорость (частицы и газа).

Инерцией обладает и газ. Однако вследствие того, что масса частицы в тысячи раз больше массы равновеликого объема газа, частица при резком изменении скорости газа или при завороте его продолжает, преодолевая сопротивление среды, двигаться в прежнем направлении и выпадает из газового потока. Таким образом, действие инерционных пылеуловителей должно быть основано на резком изменении скорости и направления движения газового потока. Для эффективного действия этих аппаратов должны быть использованы значительные скорости пылегазового потока – 15–20 м/с и больше.

К сухим пылеуловителям относятся пылеосадительные камеры, простейшие инерционные и жалюзийные пылеуловители, циклоны одиночные и батарейные, вихревые аппараты, дымососы-золоуловители и т. д.

В аппаратах данного типа поток сильно турбулизован, что приводит к явлениям отскока уже осевшей пыли.

Наиболее эффективным и распространенным на предприятиях для очистки газов от пыли видом «сухих» инерционных пылеуловителей являются центробежные пылеуловители – циклоны. Их действие

основано, как это видно из названия, на центробежной силе, придаваемой в циклоне газам. Под ее действием происходит перемещение взвешенных в газе частиц в наружные периферийные слои газа, откуда они затем осаждаются.

Увеличение центробежной силы в циклонах достигается увеличением скорости газа. Поэтому для них всегда имеется турбулентный режим газового потока с вытекающими отсюда явлениями рассеяния, разброса частиц по сечению потока, а также отскока их от поверхности осаждения обратно в поток.

Опыты показали, что степень очистки газа в циклонах (отношение массы пыли, которую удалось уловить, к поступившей в аппарат) сначала резко повышается с ростом скорости газа, а затем почти перестает расти. В то же время с увеличением скорости газа резко возрастает гидравлическое сопротивление аппарата, которое для циклонов «сухого» типа зависит только от плотности газов.

Один из путей увеличения эффективности работы циклона – уменьшение его радиуса, большая производительность обеспечивается за счет создания конструкции батарейного циклона; пример расчета такого аппарата приводится в задаче 4.

## Примеры задач по данному разделу

### Задача 1. Расчет циклона.

Рассчитать циклон для грубой стадии газоочистки.

*Исходные данные:* расход пылевоздушной смеси  $V_2 = 2400 \text{ м}^3/\text{ч}$ , температура  $T = 293 \text{ К}$ , плотность при н.у.  $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$ , вязкость  $\mu = 24,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 101,3 \text{ кПа}$ , разрежение в циклоне  $P_2 = 30 \text{ Па}$ , плотность частиц пыли  $\rho = 3000 \text{ кг/м}^3$ , диаметр частиц пыли  $d = 10 \text{ мкм}$ , диаметр циклона  $D = 500 \text{ мм}$ .

*Решение.*

1. Плотность пылевоздушной смеси при рабочих условиях рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{\rho_0 \cdot 273 (P_{\text{бар}} - P_2)}{(273 + T) P_{\text{бар}}} = \frac{1,29 \cdot 273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 - 30)}{(273 + 20) 101,3 \cdot 10^3} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

2. Коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона зависит от его диаметра, состояния внутренней поверхности стенок, запыленности газа и других факторов, учитываемых коэффициентами  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $\xi_{500}$  (табл. 1,2,3), рассчитывается по формуле:



$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500} = 1 \cdot 0,9 \cdot 155 = 139,5.$$

3. Гидравлическое сопротивление циклона при оптимальной скорости  $\omega = 3,5$  м/с рассчитывается по формуле:

$$dP = \frac{\xi \cdot \omega^2 \cdot \rho}{2} = \frac{139,5 \cdot 3,5^2 \cdot 1,2}{2} = 1025 \text{ Па.}$$

Таблица 1

Значения поправочного коэффициента  $K_1$

Тип циклона	Диаметр циклона $D$ , мм				
	150	200	300	450	500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-24	0,85	0,90	0,93	1,00	1,0

Таблица 2

Значения поправочного коэффициента  $K_2$

Тип циклона	Концентрация пыли на входе циклона $c_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	—
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86

4. Производительность одного циклона составит

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} 3600 \cdot \omega = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} 3600 \cdot 3,5 = 2473 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

5. Число циклонов в группе

$$N = \frac{V_2}{V} = \frac{2400}{2473} = 0,97.$$

Требуется установка одного циклона.

Таблица 3

Значения коэффициентов сопротивления циклонов  $\xi_{500}$  ( $D = 500$  мм)

Тип циклона	Коэффициент сопротивления $\xi_{500}$	
	при выхлопе в атмосферу	при выхлопе в гидравлическую сеть
ЦН-11	245	250
ЦН-15	155	163
ЦН-24	75	80

6. Действительная скорость смеси в циклоне

$$\omega_d = \frac{V_2}{0,785 \cdot d^2 \cdot N \cdot 3600} = 3,4 \text{ м/с.}$$

Действительная скорость отличается от оптимальной менее чем на 15 %, поэтому остановимся на выбранном циклоне ЦН-15.

### Задача 2. Расчет циклонов.

Рассчитать циклоны СИОТ N9 (старого типа) и ВЦНИИОТ исходя из следующих данных: производительность  $Q_{\text{произв}} = 15100 \text{ нм}^3/\text{ч}$ , диаметр входного патрубка циклона СИОТ №9  $D_1 = 0,545 \text{ м}$ , диаметр входного патрубка циклона ВЦНИИОТ  $D_2 = 0,7 \text{ м}$ .

*Решение.*

1) СИОТ N9.

1. Найдем скорость потока на входе в патрубок:

$$V_{\text{вх}} = \frac{Q}{0,785 \cdot D^2} = \frac{4,194}{0,785 \cdot 0,545^2} = 18 \text{ м/с.}$$

Скорость приемлема в пределах 14–20 м/с.

2. Общее гидравлическое сопротивление циклона

$$\Delta P = \frac{\xi \cdot V_{\text{вх}}^2 \cdot \rho}{2},$$

где  $\rho$  – плотность газа при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1,128 \text{ кг/м}^3$ ;

$\xi = 4,2$  – коэффициент гидравлического сопротивления данного циклона.

$$\Delta P = \frac{4,2 \cdot 18^2 \cdot 1,128}{2} = 767,5 \text{ Па.}$$

Допустимые потери для пылеуловителя.

3. Расчет эффективности очистки СИОТ N9 ведут по следующей формуле:

$$\text{Э}_\phi = \frac{G_y}{G_{\text{вх}}} 100 \%,$$

где  $G_y$  – расход улавливаемого вещества, г/с;

$G_{\text{вх}}$  – расход вещества на входе, г/с.

2) ВЦНИИОТ.

1. Рассчитаем скорость потока в циклоне:

$$V_d = \frac{Q}{0,785 \cdot D^2},$$

где  $Q$  – расход газовой смеси, принимается равным  $4,194 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Тогда

$$V_d = \frac{4,194}{0,785 \cdot 0,7^2} = 10,9 \text{ м/с.}$$

Скорость допустима.

2. Определим потери давления в циклоне:

$$\Delta P = \frac{\xi \cdot V_{\text{вх}}^2 \cdot \rho}{2},$$

где  $\xi = 10,4$  – коэффициент гидравлического сопротивления данного циклона;

$$\Delta P = \frac{10,4 \cdot 10,9^2 \cdot 1,128}{2} = 697 \text{ Па.}$$

Потери давления допустимы.

**Задача 3.** Определение размеров коллектора системы вентиляции.

Определить размеры горизонтального коллектора прямоугольной формы системы аспирационной вентиляции по исходным данным: количество воздуха  $V_0 = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , температура воздуха  $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ , разрежение перед коллектором  $P = 490 \text{ Па}$ , барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 101325 \text{ Па}$ , плотность пыли в воздухе  $\rho = 3,5 \text{ г/см}^3$ , размеры частиц пыли  $d \geq 40 \text{ мкм}$ .

*Решение.*

1. Количество воздуха, поступающего в коллектор:

$$V = V_0 \left[ \frac{101325 (273 + t)}{273 (p_{\text{бар}} \pm p)} \right] = 10^4 \frac{101325 (273 + 60)}{273 (101325 - 490)} = 12257 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

2. Определяем скорость осаждения частиц пыли значением  $v_{\text{п}} = 0,17 \text{ м/с}$ .

3. Площадь дна коллектора

$$S = \frac{V}{v_{\text{п}}} = \frac{3,14}{0,17} = 20,03 \text{ м}^2.$$

4. Приняв скорость газа в коллекторе равной  $2 \text{ м/с}$ , находим площадь его поперечного сечения:

$$S' = \frac{V}{v} = \frac{3,14}{2} = 1,7 \text{ м}^2.$$

Конструктивно принимаем высоту коллектора  $1,5 \text{ м}$ .

5. Тогда его ширина

$$b = \frac{1,7}{1,5} = 1,13 \text{ м.}$$

6. Длина коллектора составит

$$L = \frac{S}{b} = \frac{20,03}{1,13} = 17,72 \text{ м.}$$

#### Задача 4. Расчет батарейного циклона.

Рассчитать батарейный циклон для очистки  $70000 \text{ м}^3/\text{ч}$  газа, имеющего температуру  $t = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ . Химический состав газа: 32 %  $\text{CO}_2$ , 2 %  $\text{SO}_2$ , 30 %  $\text{N}_2$  и 36 %  $\text{CO}$ . Влагосодержание воздуха  $f = 4 \text{ г/м}^3$ , барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 101325 \text{ Па}$ , давление газа на входе в батарейный циклон  $P = 1476 \text{ Па}$ , плотность пыли  $\rho_n = 2500 \text{ кг/м}^3$ , запыленность газа  $q_n = 2,5 \text{ г/м}^3$ .

*Решение.*

1. Учитывая, что большая часть частиц пыли имеет размер более 3 мкм, выбираем циклонный элемент с  $D = 250 \text{ мм}$ .

По запыленности газа выбираем направляющий аппарат с углом наклона лопастей  $25^\circ$ . Коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi = 90$ .

2. Плотность газовой смеси при нормальных условиях

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \frac{1}{100} (\rho_{01}a_1 + \rho_{02}a_2 + \dots + \rho_{0n}a_n) = \\ &= \frac{1}{100} (1,963 \cdot 32 + 2,926 \cdot 2 + 1,25 \cdot 30 + 1,25 \cdot 36) = \\ &= 1,51 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

3. Плотность газовой смеси при рабочих условиях

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{(\rho_{\text{осм}} + f)273(p_{\text{бар}} \pm p)}{\left(1 + \frac{f}{0,804}\right) 101325 (273 + t)} = \\ &= \frac{(1,51 + 0,004) 273 (101325 + 1470)}{\left(1 + \frac{0,004}{0,804}\right) 101325 (273 + 180)} = 0,921 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

4. Приняв скорость газа в циклонном элементе  $v = 4 \text{ м/с}$ , находим пропускную способность по газу одного элемента:

$$V' = 3600 \frac{\pi D^2}{4} v = 3600 \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} 4 = 707 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

5. Число циклонных элементов

$$n = \frac{V}{V'} = \frac{70000}{707} = 99 \text{ шт.}$$

Берем две секции по 50 элементов.

6. Скорость газа в каждом циклонном элементе

$$v' = \frac{4V}{3600 \pi D^2 n} = \frac{4 \cdot 70000}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 \cdot 2 \cdot 50} = 3,96 \text{ м/с.}$$

7. Гидравлическое сопротивление циклонных элементов

$$\Delta P = \frac{\xi_{\text{ц}} \cdot (v')^2 \cdot \rho}{2} = \frac{90 \cdot 3,96^2 \cdot 0,921}{2} = 650 \text{ Па.}$$

8. Определим отношение:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{650}{0,921} = 706 \text{ м}^2/\text{с.}$$

Полученное значение находится в рекомендуемых пределах.

9. Общая степень очистки газа при «эталонных» условиях:

$$\eta = 1/100 \cdot \sum \Phi_i \eta_{\phi i} = 1/100 \cdot (30 \cdot 3 + 75 \cdot 5 + 85 \cdot 22 + 95 \cdot 15 + 96 \cdot 10 + 97 \cdot 20 + 98 \cdot 25) = 91,2 \text{ \%}.$$

Устанавливаем действительную степень очистки газа  $\eta = 93 \text{ \%}$ .

10. Запыленность очищенного в батарейном циклоне газа составит

$$q_{\text{к}} = \frac{q_{\text{н}}(100 - \eta)}{100} = \frac{2,5(100 - 93)}{100} = 0,175 \text{ г/нм}^3.$$

## 1.2. Очистка газов в мокрых инерционных пылеуловителях

Общим недостатком инерционных аппаратов «сухого» типа является значительный вторичный унос уже осевшей пыли. Для устранения его применяются инерционные пылеуловители с орошаемой поверхностью осаждения. В основе работы мокрых инерционных пылеуловителей лежит все тот же инерционный механизм пылеулавливания, который проявляется при обтекании газами смачиваемых поверхностей осаждения, а также при взаимодействии газов с каплями орошающей жидкости.

По принципу действия мокрые инерционные пылеуловители разделяют на четыре группы:

а) орошаемые, в которых вода стекает по стенкам в виде водяных пленок; в них пыль оседает и движется вместе с водой в виде шлама (орошаемые циклоны, пленочные пылеуловители с вертикальными насадками и т. д.);

б) орошаемые, в которых жидкость образует при стекании водяную завесу, через которую проходит запыленный поток воздуха (скрубберы, газопромыватели, камеры мокрой очистки и другие аппараты);

в) комбинированные, т. е. совмещающие первые два способа (орошаемые циклоны, трубы Вентури и т. д.);

г) пенные аппараты, в которых запыленный воздух или газ пропускают через слой пены.

К достоинствам мокрых пылеуловителей относятся: более высокая степень очистки, чем в наиболее эффективных сухих инерционных пылеуловителях (например, в скрубберах Вентури может достигаться такая же высокая степень очистки газов, как в тканевых фильтрах и электрофильтрах при улавливании высокодисперсных частиц); возможность одновременного осуществления процессов пылеулавливания, охлаждения газов и абсорбции; эффективное применение при высоких температуре и влажности газов; безопасность использования при улавливании взрывоопасной пыли. Орошение стенок при улавливании пыли не только предотвращает ее вторичный унос, но и, к примеру, для циклонов дает возможность выполнить их прямоточными, т. е. без поворота газа. Такое выполнение циклона также резко снижает его гидравлическое сопротивление.

К недостаткам мокрого пылеулавливания следует отнести: образование шламовых вод и растворов солей; высокие затраты энергии для эффективного улавливания мелких частиц; брызго- и каплеунос при форсировании работы аппаратов.

### **Примеры задач по данному разделу**

#### **Задача 5. Расчет пенного аппарата.**

Рассчитать основные размеры пенного аппарата, предназначенного для очистки вентиляционного воздуха от пыли.

*Исходные данные:* количество воздуха  $V_0 = 8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , начальная температура воздуха  $t_l = 75^\circ\text{C}$ , влагосодержание воздуха  $f_l = 100 \text{ г}/\text{м}^3$ , запыленность воздуха  $q_l = 10 \text{ г}/\text{м}^3$ , плотность пыли  $\rho_{\text{п}} = 6 \text{ г}/\text{см}^3$ , разрежение воздуха на входе в аппарат  $p = -490 \text{ Па}$ , барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 101325 \text{ Па}$ , плотность воздуха  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

*Решение.*

1. Количество воздуха, поступающего в аппарат на очистку, рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} V &= V_{0\text{сух}} \left[ \frac{101325 (273 + t)}{273 (p_{\text{бар}} \pm p)} \right] \left( 1 + \frac{f}{0,804} \right) = \\ &= \frac{8000}{3600} \cdot \frac{101325 (273 + 75)}{273 (101325 - 490)} \left( 1 + \frac{0,1}{0,804} \right) = 3,2 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

2. Определим площадь сечения аппарата, приняв скорость воздуха в нем  $v = 2$  м/с:

$$S = 3,2/2 = 1,6 \text{ м}^2.$$

3. Приняв длину сечения аппарата  $L = 2$  м, находим его ширину:

$$B = 1,6/2 = 0,8 \text{ м}.$$

Рассчитываем площадь всех отверстий в решетке пенного аппарата.

4. Принимаем диаметр отверстия  $d = 6$  мм, а скорость воздуха в отверстиях решетки  $v_0 = 10$  м/с.

$$S_0 = V/v_0 = 3,2/10 = 0,32 \text{ м}^2.$$

5. Определим число отверстий в решетке:

$$n = \frac{4S_0}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,32}{3,14 \cdot 0,006^2} = 11327 \text{ шт.}$$

6. Шаг отверстий в решетке

$$l = d_0 \sqrt{\frac{0,91}{S_0}} = 0,006 \sqrt{\frac{0,91}{0,32}} = 0,01 \text{ м}.$$

7. Количество пыли, уловленное в пенном аппарате,

$$M = \frac{V_0 \cdot q \cdot \eta}{1000} = \frac{8000 \cdot 10 \cdot 0,9}{1000} = 72 \text{ кг},$$

где  $\eta = 0,9$  – степень очистки воздуха.

Определяем расход воды в пенном аппарате. Задаемся содержанием пыли в шламе  $M_l = 50$  г/л. Принимаем, что через решетку будет проваливаться 50 % воды, которая должна содержать 75 % уловленной пыли. Остальное количество воды (50 %) будет отводиться через сливную коробку и содержать в шламе 25 % уловленной пыли. Тогда количество воды, которое будет проваливаться через решетку в бункер, составит

$$m_1 = \frac{M \cdot 0,75 \cdot 1000}{M_l} = \frac{72 \cdot 0,75 \cdot 1000}{50} = 1080 \text{ кг/ч}.$$

Количество воды, отводимое через сливную коробку,  $m_2 = 1080$  кг/ч.

Суммарное количество воды, выводимое из аппарата, будет  $1080 + 1080 = 2160$  кг/ч.

Определяем количество воды, которое испарится в аппарате в процессе охлаждения газа. Количество тепла, кВт, которое воздух отдает воде в процессе своего охлаждения, рассчитываем по формуле:

$$V = V_0 [c (t_1 - t_2) + f_1 (I_{1n} - I_{2n})],$$

где  $c$  – теплоемкость воздуха,

$$c = 1,01 \cdot 1,293 = 1,305 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С});$$

$I_{1n}$  и  $I_{2n}$  – энтальпия водяного пара соответственно при начальной и конечной температуре газа:

$$I_{1n} = 2480 + 1,96 \cdot t_1 = 2480 + 1,96 \cdot 75 = 2627 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Для определения  $I_{2n}$  находим температуру охлаждения воздуха. Она будет немного выше температуры мокрого термометра. Температуру мокрого термометра находим по табл. 4.

При начальной температуре воздуха  $t_1 = 75^\circ\text{С}$  и влагосодержании  $x_1 = f_1/\rho_0 = 0,100/1,293 = 0,0773 \text{ кг}/\text{кг}$  температура  $t_m = 50^\circ\text{С}$ .

Принимаем  $t_2 = t_m + 5 = 50 + 5 = 55^\circ\text{С}$ .

Одновременно находим конечное влагосодержание воздуха на пересечении изотермы  $t_2$  с линией  $I$ , проведенной из точки, соответствующей на диаграмме  $I-x$   $\times t_1 = 75^\circ\text{С}$  и  $x_1 = 0,0773 \text{ кг}/\text{кг}$  (рис. на с. 15):  $x_2 = 0,083 \text{ кг}/\text{кг}$  или  $f_2 = x_2 \cdot \rho_0 = 0,083 \cdot 1,293 = 0,107 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

$$I_{2n} = 2480 + 1,96 \cdot 55 = 2588 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

$$\text{Тогда } V = \frac{8000}{3600} [1,305 (75 - 55) + 0,1 (2627 - 2588)] = 66,66 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

Таблица 4

Температура мокрого термометра

Начальная влажность газов, г/м <sup>3</sup>	Начальная температура горячих газов, °С						
	100	200	300	400	500	750	1000
25	38,5	49,5	57,0	62,0	65,5	72,5	77,5
50	44,0	53,5	59,5	64,0	67,5	74,0	78,5
100	52,5	59,0	63,5	68,0	70,5	76,5	80,5
200	61,0	66,5	70,0	72,5	75,5	79,5	—
300	68,0	71,5	74,0	78,5	—	—	—

Количество испарившейся воды составит

$$m_3 = \frac{V \cdot 3,6 \cdot 10^3}{2350} = \frac{66,66 \cdot 3,6 \cdot 10^3}{2350} = 102 \text{ кг}/\text{ч},$$

где 2350 кДж/кг – количество тепла, затрачиваемого на испарение 1 кг воды при температуре газа  $t_2 = 55^\circ\text{С}$ ;

$3,6 \cdot 10^3$  – коэффициент пересчета киловатт-часа в кДж.

Общее количество воды, подаваемой в аппарат, составит

$$m_1 + m_2 + m_3 = 1080 + 1080 + 102 = 2262 \text{ кг}/\text{ч}.$$



Находим гидравлическое сопротивление решетки вместе с водяной пеной с учетом того, что толщина решетки 5 мм; высота слоя пены 100 мм; температура воды на выходе из пенного аппарата

$$t_b = t_m - 5 = 50 - 5 = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Плотность воды при температуре  $t_b = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет  $\rho_b = 990 \text{ кг/м}^3$ .

Рассчитываем плотность воздуха при рабочих условиях:

$$\rho = \frac{(\rho_0 + f_2) 273 (p_{\text{бар}} - p)}{\left(1 + \frac{f_2}{0,804}\right) 101325 (273 + t_2)} =$$

$$= \frac{(1,293 + 0,107) 273 (101325 - 490)}{\left(1 + \frac{0,107}{0,804}\right) 101325 (273 + 55)} = 1,023 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент  $K_c = 1,0$ .

$$\Delta p = 1,45 \cdot 1,0 \frac{10^2}{2} 1,023 + 1,2 \cdot 990 \left(\frac{0,1^2}{2}\right)^{0,83} + 150 = 239 \text{ Па}.$$

Гидравлическое сопротивление пенного аппарата рассчитывают по потерям на трение и местные сопротивления в зависимости от формы и размера аппарата. Обычно оно составляет с учетом сопротивления пенной решетки 490–1700 Па. Эффективность очистки определяется по аддитивности для частиц разной крупности. Так, по принятым скоростям газа в сечении аппарата  $v = 2 \text{ м/с}$ , высоте слоя пены  $H = 100 \text{ мм}$  и плотности пыли для частиц размером 2,5 мкм –  $\eta_{\text{ф}} = 86 \text{ } \%$ ; 8 мкм –  $\eta_{\text{ф}} = 95 \text{ } \%$ ; 15 мкм –  $\eta_{\text{ф}} = 99 \text{ } \%$ ; 25 мкм –  $\eta_{\text{ф}} = 99,5 \text{ } \%$ :

$$\eta = \frac{1}{100} (86 \cdot 5 + 95 \cdot 30 + 99 \cdot 50 + 99,5 \cdot 15) = 97,2 \text{ } \%.$$

#### **Задача 6.** Расчет полого скруббера.

Рассчитать полый скруббер для охлаждения влажного газа.

*Исходные данные:*  $V_0 = 50 \text{ тыс. нм}^3/\text{ч}$ ,  $t_1 = 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_2 = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Химический состав газа: 57 % CO, 21 % N<sub>2</sub>, и 22 % CO<sub>2</sub>. Начальное влагосодержание газа  $f_1 = 25 \text{ г/см}^3$ , давление газа перед скруббером  $p = 49 \text{ 000 Па}$ , барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 101325 \text{ Па}$ , температура поступающей в скруббер воды  $t_n = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура воды на выходе из скруббера  $t_k = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Решение.*

1. Определяем количество сухих газов при н. у.:

$$V_{\text{осух}} = \frac{V_{\text{овл}} \cdot 0,804}{(0,804 + f_1)} = \frac{\left(\frac{50000}{3600} \cdot 0,804\right)}{(0,804 + 0,025)} = 13,47 \text{ м}^3/\text{с}.$$



Рассчитываем теплоемкости компонентов:

$$c_{\text{CO}} = 1,050 \cdot 1,25 = 1,312 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$c_{\text{N}_2} = 1,040 \cdot 1,25 = 1,29 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$c_{\text{CO}_2} = 0,836 \cdot 1,963 = 1,64 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}).$$

2. Тогда

$$c_{\text{см}} = 1,312 \cdot 0,57 + 1,29 \cdot 0,21 + 1,64 \cdot 0,22 = 1,482 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}).$$

3. Начальная и конечная энтальпия водяного пара по заданным параметрам:

$$I_{1n} = 2480 + 1,96t_1 = 2480 + 1,96 \cdot 350 = 3165 \text{ кДж/кг},$$

$$I_{2n} = 2480 + 1,96t_2 = 2480 + 1,96 \cdot 95 = 2666 \text{ кДж/кг}.$$

4. Количество тепла, которое газ отдает в процессе охлаждения:

$$Q = V_0 [c_{\text{см}}(t_2 - t_1) + f_1(I_{1n} - I_{2n})] = \\ = 13,47 [1,482 (350 - 95) + 0,025 (3165 - 2666)],$$

$$Q = 5259 \text{ кВт}.$$

5. Рассчитаем среднюю разность температур газа и воды в скруббере:

$$\Delta t = \frac{[(t_1 - t_{\text{к}}) - (t_2 - t_{\text{н}})]}{2,3 \lg \frac{t_1 - t_{\text{к}}}{t_2 - t_{\text{н}}}} = \frac{[(350 - 50) - (95 - 30)]}{2,3 \lg \frac{350 - 50}{95 - 30}} = 154 ^\circ\text{C}.$$

6. Определяем рабочий объем скруббера, при этом коэффициент теплопередачи принимаем равным  $200 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ :

$$V_{\text{скр}} = 5259 / (200 \cdot 154) = 171 \text{ м}^3.$$

7. Рассчитаем массовый расход воды, примем коэффициент испарения  $\psi$  равным 0,5. Удельная теплоемкость водяного пара будет  $2,01 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ :

$$M_{\text{в}} = \frac{Q}{[\psi c_{\text{п}}(t_{\text{г}} - t_{\text{н}}) + (1 - \psi)(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})]} = \\ = \frac{5259 \cdot 10^3}{[0,5 \cdot 2010 (95 - 30) + (1 - 0,5) (50 - 30)]} = 55,09 \text{ кг/с}.$$

8. Для выражения влагосодержания  $f_2 = x_2 \rho_0$  находим плотность газовой смеси при нормальных условиях:

$$\rho_0 = \frac{1}{100} (\rho_{01} \cdot a_1 + \rho_{02} \cdot a_2 + \dots + \rho_{0n} \cdot a_n) = \\ = \frac{1}{100} (1,25 \cdot 57 + 1,25 \cdot 21 + 1,963 \cdot 22) = 1,4 \text{ кг/м}^3.$$

$$\text{Тогда } f_2 = 0,135 \cdot 1,4 = 0,189 \text{ кг/м}^3.$$

9. Рассчитаем объем газа при рабочих условиях на выходе из скруббера:

$$V = V_0 \frac{p_{\text{бар}}(273 + t)}{273 (p_{\text{бар}} \pm p)} \left( 1 + \frac{f_2}{0,804} \right) =$$

$$= \frac{50000}{3600} \frac{101325(273 + 95)}{273(101325 + 49000)} \left( 1 + \frac{0,189}{0,804} \right) = 15,59 \text{ м}^3/\text{с}.$$

10. Определяем размеры скруббера. Приняв скорость газа в нем равной 1,0 м/с, рассчитываем диаметр скруббера:

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 15,59}{3,14 \cdot 1,0}} = 4,45 \text{ м}.$$

11. Высоту скруббера находим из уравнения

$$H = \frac{4V_{\text{скр}}}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 171}{3,14 \cdot 4,45^2} = 10,98 \text{ м}.$$

Отношение  $H / D = 10,98 / 4,45 = 2,47$  близко к рекомендуемой практикой величине 2,5. Рассчитаем количество форсунок для установки на скруббере. Примем к установке в скруббер эвольвентные форсунки диаметром 75 мм и с соплом диаметром 25,3 мм.

12. Задавшись давлением воды перед форсункой  $2 \cdot 10^3$  кПа, получим

$$M_1 = \frac{18,5 \cdot 1000}{3600} = 5,1 \text{ кг/с}.$$

13. Число форсунок, которое требуется установить в скруббере, составит

$$n = \frac{M_{\text{в}}}{M_1} = \frac{55,09}{5,1} = 11 \text{ шт}.$$

### **Задача 7.** Расчет мокрого центробежного циклона.

Требуется определить размеры, гидравлическое сопротивление мокрого центробежного циклона, эффективность очистки, а также расход воды на нее.

*Исходные данные:* количество вентиляционного воздуха при рабочих условиях  $V = 28000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; температура воздуха  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; воздух в трубопроводе на входе в циклон находится под избыточным давлением  $p = 300 \text{ Па}$ ; барометрическое давление  $p_{\text{бар}} = 101325 \text{ Па}$ ; начальная запыленность воздуха  $q_1 = 1,0 \text{ г/м}^3$ ; плотность пыли  $\rho_{\text{п}} = 2 \text{ г/см}^3$ . Дисперсный состав пыли характеризуется данными, представленными в табл. 5.

## Дисперсный состав пыли

Размер частиц, мкм	Средний размер частиц, мкм	%, по массе
0–5	3,0	2
5–10	7,5	18
10–15	12,5	25
15–20	17,5	25
20–30	25,0	15
30–40	35,0	10
> 40	45,0	15

*Решение.*

В соответствии с рекомендациями принимаем скорость воздуха в цилиндрической части циклона  $v = 4$  м/с и находим его диаметр по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 28000}{3600 \cdot 3,14 \cdot 4}} = 1,574 \text{ м.}$$

2. Ввиду того, что циклон не следует делать диаметром более 1200 мм, принимаем к установке два циклона и рассчитываем диаметр каждого, считая, что воздух будет поступать в них параллельно:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 28000}{2 \cdot 3600 \cdot 3,14 \cdot 4}} = 1,113 \text{ м.}$$

3. Остальные части циклона находим по следующим зависимостям. Высоту цилиндрической части циклона выбираем в 6,5 раза больше его диаметра:

$$H = 6,5D = 6,5 \cdot 1,113 = 7,23 \text{ м.}$$

4. Высоту бункера принимаем равной половине диаметра циклона:

$$H_6 = 0,5D = 0,5 \cdot 1,113 = 0,557 \text{ м.}$$

5. Площадь входного и выходного патрубков циклона определяем в зависимости от рекомендованной для них скорости воздуха  $v = 21$  м/с:

$$S_{\pi} = \frac{V}{3600 n v} = \frac{28000}{3600 \cdot 2 \cdot 21} = 0,185 \text{ м}^2,$$

где  $n$  – число циклонов.

6. Высоту патрубков для входа и выхода выбираем исходя из соотношения  $h_{\pi} = 0,8D = 0,8 \cdot 1,113 = 0,89$  м.

7. Ширина патрубка

$$B_{\Pi} = \frac{S_{\Pi}}{h_{\Pi}} = \frac{0,185}{0,89} = 0,207 \text{ м.}$$

8. Находим значение гидравлического сопротивления циклона. При диаметре циклона  $D = 1,113$  м коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi = 2,84$ .

9. Плотность воздуха при рабочих условиях находим при нормальных условиях  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ :

$$\rho = \rho_{0\text{см}} \left[ \frac{273(p_{\text{бар}} \pm p)}{101325(273 + t)} \right] = 1,293 \left[ \frac{273(101325 + 300)}{101325(273 + 20)} \right] = 1,208 \text{ кг/м}^3.$$

10. Тогда

$$\Delta p = 2,84 \frac{1,208 \cdot 21^2}{2} = 756 \text{ Па.}$$

11. Расход воды на орошение стенок циклона составит

$$M_{\text{в}} = 0,14 \pi D = 0,14 \cdot 3,14 \cdot 1,113 = 0,49 \text{ л/с или } 1764 \text{ л/ч.}$$

Расход воды на два циклона будет равен 3528 л/ч. На промывку циклона расход воды принимаем в 1,5 раза больше, чем на орошение, т. е. для промывки одного циклона потребуется воды  $1,5 \cdot 1764 \text{ л/ч}$ .

Вода к соплам поступает из уравнительного бачка под давлением 19,6 кПа.

12. Определяем степень очистки газа в циклоне. Ниже приведены данные, использованные в дальнейшем расчете:

Средний размер частиц пыли, мкм	3,0	7,5	12,50	17,5	25,0	35,0	45,0
Скорость витания частиц, см/с	0,1	0,3	0,75	1,8	3,8	7,5	11,5
Фракционная эффективность, %	85,00	85,00	90,30	90,30	92,90	94,30	95,50

13. Общая степень очистки воздуха в циклоне диаметром 1 м:

$$\eta = 1/100 \cdot (\sum \Phi_i n_{\phi i}) = 1/100 \cdot (85 \cdot 2 + 85 \cdot 18 + 2 \cdot 90,3 \cdot 25 + 92,8 \cdot 15 + 94,3 \cdot 10 + 95,5 \cdot 15) = 90,81 \%$$

14. Для рассчитанного диаметра циклона действительное значение степени очистки воздуха

$$\eta_d = 1 - (1 - \eta) \sqrt{D} = 1 - (1 - 0,9081) \sqrt{1,113} = 0,903 \text{ или } 90,3 \%.$$

15. Конечное содержание пыли в очищенном воздухе

$$q_{\text{кон}} = q_1 (1 - \eta_d) = 1 (1 - 0,903) = 97 \text{ мг/м}^3.$$

**Задача 8.** Расчет скоростных пылеуловителей с трубами Вентури для очистки мартеновского газа.

*Исходные данные:* влагосодержание газа  $f_1 = 50$  г/нм<sup>3</sup>; количество газа  $V_0 = 80$  тыс. нм<sup>3</sup>/ч; температура газа, поступающего на газоочистку,  $t = 250$  °С; запыленность газа  $q_1 = 4$  г/м<sup>3</sup>; разрежение перед трубами Вентури  $p = 3000$  Па; барометрическое давление  $p_{\text{бар}} = 101\,325$  Па. Состав газа: 20 % CO<sub>2</sub>; 70 % N<sub>2</sub> и 10% O<sub>2</sub>. Требуемая конечная запыленность газа  $q_2 = 90$  мг/м<sup>3</sup>; температура воды, подаваемой в аппараты,  $t_{1в} = 30$  °С.

*Решение.*

1. Находим требуемую эффективность пылеуловителя:

$$\eta = \frac{(q_1 - q_2)}{q_1} = \frac{(4000 - 90)}{4000} = 0,977.$$

2. Число единиц переноса определяем по формуле:

$$N_q = \ln \left[ \frac{1}{(1 - \eta)} \right] = \ln \left[ \frac{1}{(1 - 0,977)} \right] = 3,77.$$

3. Находим значение удельной энергии  $K_T$ . Значения  $A$  и  $B$  берем из справочников:

$$N_q = A \cdot K_T^B = 3,77 = 1,565 \cdot 10^{-6} K_T^{1,619},$$

откуда  $K_T = 8846$  кДж / 1000 м<sup>3</sup>.

4. Рассчитываем количество газа, поступающего в трубы Вентури при рабочих условиях:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0 \frac{p_{\text{бар}} (273 + t)}{273 (101325 - p)} \left( 1 + \frac{f_1}{0,804} \right) = \\ &= \frac{80000}{3600} \frac{101325 (273 + 250)}{273 (101325 - 3000)} \left( 1 + \frac{0,050}{0,804} \right) = 46,59 \text{ нм}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

5. Приняв удельный расход воды  $m = V_B / V_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> / м<sup>3</sup>, найдем общий расход воды на трубы Вентури:

$$V_B = m \cdot V_1 = 1 \cdot 46,59 = 46,59 \text{ л/с}.$$

6. Рассчитаем гидравлическое сопротивление скруббера Вентури, приняв давление воды  $p_B = 300$  кПа:

$$\Delta p = K_T - p_B m = 8846 - 300000 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 8546 \text{ Па}.$$

7. Находим плотность газа на входе в трубу Вентури:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= (1/100) \left[ \rho_{\text{CO}_2} x_{\text{CO}_2} + \rho_{\text{N}_2} x_{\text{N}_2} + \rho_{\text{O}_2} x_{\text{O}_2} \right] = \\ &= \frac{1}{100} [1,963 \cdot 20 + 1,25 \cdot 70 + 1,429 \cdot 10] = 1,41 \text{ кг/нм}^3. \end{aligned}$$

8. Рассчитаем температуру газа на выходе из трубы Вентури:

$$t = (0,133 - 0,041m)t_1 + 35 = (0,133 - 0,041 \cdot 1) 250 + 35 = 58 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

9. Находим влагосодержание газа на выходе из труб Вентури:

$$x_1 = \frac{f_1}{\rho_0} = \frac{0,05}{1,41} = 0,035 \text{ кг/кг}.$$

10. Находим плотность газа при рабочих условиях на выходе из скруббера Вентури:

$$\begin{aligned} \rho_2 &= \frac{(\rho_0 + f_2)273 (p_{\text{бар}} - p - \Delta p)}{\left(1 + \frac{f_2}{0,804}\right) p_{\text{бар}} (273 + 58)} = \\ &= \frac{(1,41 + 0,155)273 (101325 - 3000 - 8,546)}{\left(1 + \frac{0,155}{0,804}\right) 101325 (273 + 58)} = 0,959 \text{ кг/нм}^3. \end{aligned}$$

11. Находим количество газа на выходе из трубы Вентури:

$$V_2 = \left(\frac{V_0}{3600}\right) \left(\frac{\rho_0}{\rho_2}\right) = \left(\frac{80000}{3600}\right) \left(\frac{1,41}{0,959}\right) = 32,66 \text{ м}^3/\text{с}.$$

12. Размеры инерционного пыле- и каплеуловителя (бункера) определяем по скорости в его поперечном сечении  $v_6 = 2,5 \text{ м/с}$ :

$$D_6 = 1,13 \sqrt{\frac{V_2}{v_6}} = 1,13 \sqrt{\frac{32,66}{2,5}} = 4,02 \text{ м}.$$

13. Высоту цилиндрической части принимаем  $H_6 = 4,3 \text{ м}$ .

14. Гидравлическое сопротивление бункера рассчитываем, приняв  $\xi_6 = 80$ :

$$\Delta p_6 = \xi \left(\frac{v_6^2}{2}\right) \rho_2 = 80 \left(\frac{2,5^2}{2}\right) 0,959 = 240 \text{ Па}.$$

15. Выбираем для установки центробежный скруббер типа МП-ВТИ и находим его диаметр. Скорость газа в цилиндрической части скруббера принимаем  $v = 4,5 \text{ м/с}$ :

$$D_{\text{скр}} = 1,13 \sqrt{\frac{V_2}{v_2}} = 1,13 \sqrt{\frac{32,66}{4,5}} = 3,044 \text{ м}.$$

16. Предусматриваем стандартный скруббер диаметром 3300 мм и рассчитываем действительную скорость газа в нем:

$$v = \frac{4V_2}{\pi D_{\text{скр}}^2} = \frac{4 \cdot 32,66}{3,14 \cdot 3,3^2} = 3,82 \text{ м/с}.$$

17. Для рассчитываемого скруббера



$$H = 3,8 D_{\text{скр}} = 3,8 \cdot 3,3 = 12,54 \text{ м.}$$

18. Определяем гидравлическое сопротивление скруббера при  $\xi = 34$ :

$$\Delta p_{\text{скр}} = \xi \left( \frac{v^2}{2} \right) \rho_2 = 34 \left( \frac{3,82^2}{2} \right) 0,959 = 238 \text{ Па.}$$

19. Гидравлическое сопротивление труб Вентури составит

$$\Delta p_{\text{ТВ}} = \Delta p_0 - \Delta p_6 - \Delta p_{\text{скр}} = 8546 - 40 - 238 = 8068 \text{ Па.}$$

20. Рассчитываем скорость газа в горловине трубы Вентури:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{\text{ТВ}}}{(\xi_c \rho_2 + \xi_c \rho_{\text{ж}} m)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8068}{(0,15 \cdot 0,959 + 0,75 \cdot 996 \cdot 1 \cdot 10^{-3})}} = 135 \text{ м/с.}$$

21. Определяем геометрические размеры трубы Вентури. Для обеспечения равномерного орошения трубы Вентури через одну центрально расположенную форсунку принимаем диаметр горловины трубы  $D_2 = 300$  мм и рассчитываем число труб Вентури:

$$D_2 = 1,13 \sqrt{V_2 / v_2 n}.$$

Откуда

$$n = 1,13^2 \frac{V_2}{v_2 D_2^2} = 1,13^2 \left( \frac{32,66}{155 \cdot 0,3^2} \right) = 4 \text{ шт.}$$

22. Приняв четыре трубы Вентури, уточняем диаметр горловины:

$$D_2 = 1,13 \sqrt{\frac{32,66}{(135 \cdot 4)}} = 0,277 \text{ м.}$$

23. Рассчитываем диаметр входного сечения конфузора, приняв скорость газа в нем  $v_1 = 20$  м/с:

$$D_1 = 1,13 \sqrt{\frac{V_1}{v_1 n}} = 1,13 \sqrt{\frac{46,59}{20 \cdot 4}} = 0,862 \text{ м.}$$

24. Диаметр выходного сечения диффузора при скорости газа в нем  $v_3 = 20$  м/с

$$D_3 = 1,13 \sqrt{\frac{V_2}{v_3 n}} = 1,13 \sqrt{\frac{32,66}{20 \cdot 4}} = 0,722 \text{ м.}$$

25. Находим длины отдельных частей трубы Вентури:

а) длина конфузора при  $\alpha_1 = 25^\circ$ :

$$l_1 = 2,25 (D_1 - D_2) = 2,25 (0,862 - 0,277) = 1,316 \text{ м,}$$

б) длина горловины

$$l_2 = 0,15D_2 = 0,15 \cdot 0,277 = 0,042 \text{ м,}$$

в) длина диффузора

$$l_3 = \frac{(D_3 - D_2)}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2}} = \frac{(0,772 - 0,277)}{2 \operatorname{tg} \frac{6}{2}} = 4,279 \text{ м.}$$

26. Полная длина каждой трубы Вентури:

$$l = l_1 + l_2 + l_3 = 1,316 + 0,042 + 4,279 = 5,637 \text{ м.}$$

### 1.3. Очистка газов в пористых фильтрах

К аппаратам, работающим на принципе фильтрования, относятся: промышленные фильтры – тканевые, которые подразделяются, в свою очередь, по конструктивным признакам на рукавные, плоские, клиновы; кассетные, с насыпным слоем зернистого материала, из пористой пластмассы, керамики, металлокерамики и других материалов; фильтры тонкой очистки (волоконистые); фильтры для очистки атмосферного воздуха (сетчатые фильтры).

Такие аппараты дают тонкую очистку газа от пыли, однако они обладают значительным гидравлическим сопротивлением и сравнительно непродолжительным сроком службы фильтрующего материала, они очень чувствительны к температуре: выше 100 °С фильтры из природных материалов, таких как бумажная или шерстяная ткань, уже обугливаются, и даже при 60–80 °С вещество ткани фильтра очень быстро термически разлагается, ткань становится хрупкой, в ней возникают прорехи, и степень улавливания значительно снижается. Влажность газа должна быть низкой, чтобы исключить возможность конденсации пара или замазывания ткани. В то же время слишком сухой газ недопустим, так как сухая ткань опять-таки становится непрочной. Агрессивные среды химически разрушают ткань фильтра. Поэтому наиболее распространенными стали тканевые фильтры из синтетических материалов, таких как лавсан, нитрон, оксалон, и смешанных материалов.

Тканевые фильтры широко применяются для очистки аспирационного воздуха из помещений, от дробильных агрегатов, так как здесь указанные условия соблюдаются; в других же случаях предпочтительней применение фильтров с насыпным слоем зернистого фильтровального материала, обладающего значительно большей устойчивостью к температуре или агрессивности среды.

При расчете учитывается гидравлическое сопротивление фильтров.

## Пример задачи по данному разделу

### Задача 9. Расчет рукавного фильтра.

*Исходные данные:* расход газа  $V_0 = 8000 \text{ нм}^3/\text{ч}$ ; температура газа  $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ; давление  $P_{\text{атм}} = 101,3 \text{ кПа}$ ; разрежение  $P = 500 \text{ Па}$ ; динамический коэффициент вязкости  $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; плотность газа  $\rho_0 = 2,15 \text{ кг/нм}^3$ ; концентрация пыли в газе перед фильтром  $Z_0 = 8 \text{ г/нм}^3$ ; плотность частиц пыли  $\rho_{\text{ч}} = 2600 \text{ кг/нм}^3$ ; гидравлическое сопротивление фильтра  $\Delta p = 1,3 \text{ кПа}$ .

*Решение.*

1. Полный расход газа, идущего на фильтрование при рабочих условиях:

$$V_{\text{Г}} = V_{0\text{Г}} \frac{(273 + T_{\text{Г}}) 101,3}{273 (P_{\text{бар}} - P_{\text{Г}})} = 8000 \frac{(273 + 22) 101,3}{273 (101,3 - 0,5)} = 8687 \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

2. Запыленность газа перед фильтром при рабочих условиях

$$z_{\text{Г}} = z_{01} \frac{V_{0\text{Г}}}{V_{\text{Г}}} = 8 \frac{8000}{8687} = 7,37 \text{ г/нм}^3.$$

3. Допустимая газовая нагрузка на фильтр (скорость фильтрации):

$$q_{\text{ф}} = q_{\text{н}} \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5 = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1 = 1,8 \text{ м/мин или } 0,03 \text{ м/с},$$

где  $q_{\text{н}}$  – нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли;

$c_1$  – коэффициент, учитывающий способ регенерации;

$c_2$  – коэффициент, учитывающий начальную запыленность газов;

$c_3$  – коэффициент, учитывающий дисперсный состав пыли;

$c_4$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры газа;

$c_5$  – коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки газа.

4. Полное гидравлическое сопротивление фильтра  $\Delta p$  складывается из сопротивления корпуса  $\Delta p_{\text{к}}$  и сопротивления фильтровальной перегородки  $\Delta p_{\text{ф}}$ :

$$\Delta p = \Delta p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{ф}}.$$

5. Плотность газа при рабочих условиях

$$\rho_{\text{Г}} = \rho_0 \frac{273 (P_{\text{бар}} - P_{\text{Г}})}{(273 + T_{\text{Г}}) P_{\text{бар}}} = 2,15 \frac{273 (101,3 - 0,5)}{(273 + 22) 101,3} = 2 \text{ кг/нм}^3.$$

6. Гидравлическое сопротивление корпуса фильтра

$$\Delta P_{\text{к}} = \frac{b \cdot W_{\text{вх}}^2 \cdot \rho_{\text{Г}}}{2} = \frac{2 \cdot 6^2 \cdot 2}{2} = 72 \text{ Па},$$

где  $W_{\text{вх}}$  – принимаемая скорость газа при входе в фильтр, 6 м/с;

$b$  – задаваемый коэффициент сопротивления,  $b = 2$ .

7. Сопротивление фильтровальной перегородки складывается из сопротивления запыленной ткани  $\Delta p_1$  и сопротивления накапливающегося слоя пыли  $\Delta p_2$ .

Постоянные фильтрования:

$$A = 1100 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}; B = 6,5 \cdot 10^9 \text{ м/кг}.$$

8. Динамический коэффициент вязкости газа при рабочих условиях

$$\mu = \mu_0 \frac{(273 + c)}{(T_{\text{абс}} + c)} \left( \frac{T_{\text{абс}}}{273} \right)^{1,5} = 17,3 \cdot 10^{-6} \frac{(273 + 124)}{(295 + 124)} \left( \frac{295}{273} \right)^{1,5} =$$

$$= 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с},$$

где  $c = 124$ .

9. Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки при  $\Delta p = 1,3 \text{ кПа}$ :

$$\Delta p_{\phi} = \Delta p - \Delta p_{\kappa} = 1300 - 72 = 1228 \text{ Па}.$$

10. Продолжительность периода фильтрования между двумя регенерациями равна:

$$t_{\phi} = \frac{(\Delta P_{\phi} / \mu \cdot q_{\phi}) - A}{B \cdot q_{\phi} \cdot z_{\Gamma}} = \frac{(1228 / 18,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,03) - 1100 \cdot 10^6}{6,5 \cdot 10^9 \cdot 0,03 \cdot 7,37 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 791 \text{ с}.$$

11. Количество регенераций в течение одного часа

$$n_p = \frac{3600}{t_{\phi} + t_p} = \frac{3600}{791 + 50} = 4,$$

где  $t_p$  – задаваемая продолжительность процесса регенерации, 50 с.

12. Необходимая площадь фильтрования

$$F'' = \frac{V_{\Gamma}}{60 \cdot q_{\phi}} = \frac{8687}{60 \cdot 1,8} = 80 \text{ м}^2.$$

Выбираем для установки фильтр марки ФРКН-90В с поверхностью фильтрации  $90 \text{ м}^2$ , числом секций – 3, высотой рукава – 2 м, числом рукавов – 108.

$$N_c \cdot F_c = 90 \text{ м}^2.$$

13. Площадь фильтрования  $F_p$ , отключаемая на регенерацию в течение одного часа:

$$F_p = \frac{N_c \cdot F_c \cdot n_p \cdot t_p}{3600} = \frac{90 \cdot 4 \cdot 50}{3600} = 5,0 \text{ м}^2.$$

14. Площадь фильтрования

$$F_{\phi} = V_{\Gamma} / 60 \cdot q_{\phi} + F_p = 8687 / 60 \cdot 1,8 + 5 = 85,4 \text{ м}^2.$$

15. Фактическая удельная газовая нагрузка

$$q''_{\phi} = \frac{V_{\Gamma}/60 + F_c \cdot q_{\phi}}{F_{\phi} - F_c} = \frac{8687/60 + 0,83 \cdot 1,8}{90 - 0,83} = 1,65 \text{ м/мин.}$$

16. Эффективность очистки газа

$$\eta = 1 - \frac{V_{\text{вых}} \cdot z_{\text{вых}}}{V_{\Gamma} \cdot z_{\Gamma}} = 1 - \frac{8696 \cdot 0,08}{8687 \cdot 7,37} = 0,99 \text{ или } 99 \%,$$

где  $V_{\Gamma}$ ,  $V_{\text{вых}}$  – объемный расход газа на входе и на выходе из фильтра,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$z_{\Gamma}$ ,  $z_{\text{вых}}$  – запыленность газов на входе и выходе из фильтра соответственно,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

В качестве материала для рукавов выбираем лавсан (без начеса).

#### 1.4. Электрическая очистка газов

При наличии в газе заряженных частиц (положительных и отрицательных ионов и свободных электронов) он становится проводником электрического тока, и появляется возможность применять для очистки таких газов электрофильтры.

При электрической очистке газов от пыли или тумана загрязняющих веществ газ, содержащий взвешенные частицы или капельки тумана, пропускается через электрическое поле высокого напряжения. В результате этого он ионизируется, заряжает содержащиеся в газе частицы пыли или жидкости, которые осаждаются на осадительном электроде электрофильтра. По мере накопления слоя частиц они удаляются с осадительных электродов встряхиванием и попадают на дно электрофильтра. Существуют электрофильтры однозонные и двухзонные – сухие горизонтальные и сухие вертикальные, мокрые электрофильтры. Все эти типы электрофильтров разделяются по форме на трубчатые и пластинчатые.

При выборе электрофильтров необходимо учитывать то, что трубчатые работают эффективнее, так как у них более однородное электрическое поле и распределение газа по сечению. Однако их недостатком является большой расход металла.

Кроме того, необходимо учитывать также и коррозионную активность среды, для которой осуществляется выбор электрофильтра, и соответственно производить подбор материала осадительных и коронирующих электродов.

## Пример задачи по данному разделу

### Задача 10. Расчет параметров электрофилтра.

*Исходные данные:* температура газов  $t_2 = 150^\circ\text{C}$ ; разрежение в системе  $p_r = 2 \text{ кН/м}^2$  (200 мм. вод. ст.); содержание пыли в газах  $36,4 \text{ мг/нм}^3$ ; средний радиус частиц  $0,5 \text{ мкм}$ ; скорость газов в электрофилтре  $v = 0,8 \text{ м/с}$ ; радиус коронирующего электрода  $R_1 = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; расстояние между коронирующими электродами  $d = 0,24 \text{ м}$ ; активная длина коронирующих электродов  $l = 924 \text{ мм}$ ; количество осадительных электродов  $n = 16$ ; площадь осадительных электродов  $S = 242 \text{ м}^2$ ; расстояние между плоскостями осадительных и коронирующих электродов  $H = 0,15 \text{ м}$ ; напряжение  $U_{\text{ср}} = 46 \text{ кВ}$ ; суммарная длина электрического поля  $L = 4,8 \text{ м}$ ; активная площадь сечения электрофилтра  $F = 7,5 \text{ м}^2$ .

*Решение.*

1. Относительная плотность газов:

$$\beta = \frac{(P_{\text{бар}} \pm p_r) (273 + 20)}{1,013 \cdot 10^5 \cdot (273 + t)} = \frac{(1,013 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^3) (273 + 20)}{1,013 \cdot 10^5 \cdot (273 + 150)} = 0,68.$$

2. Критическая напряженность электрического поля

$$E_0 = 3,04 (\beta + 0,0311 \sqrt{\beta/R_1}) 10^6 = 3,04 (0,68 + 0,0311 \sqrt{0,68/1,25 \cdot 10^{-3}}) 10^6 = 4,26 \cdot 10^6 \text{ В/м}.$$

3. Критическое напряжение короны:

$$\begin{aligned} v_0 &= E_0 \cdot R_1 (\pi H/d - \ln(2\pi R_1)/d); \\ \pi H/d &= (3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-1})/(2,4 \cdot 10^{-1}) = 1,96; \\ \ln(2\pi R_1)/d &= 2,3 \lg(2 \cdot 3,14 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3})/(2,4 \cdot 10^{-1}) = -3,42; \\ v_0 &= 4,26 \cdot 10^6 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} (1,96 + 3,42) = 28,5 \cdot 10^3 \text{ В}. \end{aligned}$$

4. Линейная плотность тока короны:

$$i_0 = (4 \pi^2 \cdot k \cdot v)/(9 \cdot 10^9 \cdot d^2 (\pi H/d - \ln(2\pi R_1)/d)) \cdot U(U - v_0).$$

При  $H/d = 0,15 / 0,24 = 0,625$

$$v = 7,7 \cdot 10^{-2} (\text{Н} \cdot \text{с/м}^2) / (\text{кг/м}^3);$$

$$\begin{aligned} i_0 &= \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 7,7 \cdot 10^{-2} \cdot 2,1 \cdot 10^{-4}}{9 \cdot 10^9 \cdot 0,24^2 \cdot (1,96 + 3,42)} 46 \cdot 10^3 (46 \cdot 10^3 - 28,5 \cdot 10^3) = \\ &= 0,185 \text{ мА/м}, \end{aligned}$$

где  $k = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ .

5. Напряженность электрического поля:

$$E = \sqrt{\frac{(8 \cdot i_0 \cdot H)}{(4 \pi E_0 \cdot k \cdot d)}} = \sqrt{\frac{(8 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3} \cdot 0,625)}{(4 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4})}} =$$

$$= 1,99 \cdot 10^5 \text{ В/м.}$$

Принимаем, что  $E_3 = E_{oc} = E$ .

6. Скорость движения частиц (скорость дрейфа) диаметром от 2 до 50 мкм:

$$\omega_n = (0,118 \cdot 10^{-10} E^2 \cdot r) / \mu.$$

7. Вязкость газов:

$$\mu = \frac{\mu_0 (273 + C)}{(T + C)} (T/273)^{3/2},$$

$$\left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} = \sqrt{\left(\frac{423}{273}\right)^3} = 1,93.$$

8. Вязкость газов определяется как сумма вязкостей:

$$\mu_{\text{NO}_2} = \frac{0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,93 (273 + 0)}{(423 + 0)} = 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2;$$

$$\mu_{\text{CO}} = \frac{0,137 \cdot 10^{-4} \cdot 1,93 (273 + 100)}{(423 + 100)} = 0,19 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2;$$

$$\mu_{\text{SO}_2} = \frac{0,112 \cdot 10^{-4} \cdot 1,93 (273 + 396)}{(423 + 396)} = 0,18 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2;$$

$$\mu_{\text{пыль}} = \frac{0,256 \cdot 10^{-4} \cdot 1,93 (273 + 624)}{(423 + 624)} = 0,43 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2.$$

9. Молекулярная масса:

$$M = a_{\text{NO}_2} M + a_{\text{CO}} M + a_{\text{SO}_2} M + a_{\text{SiO}_2} M =$$

$$= 0,14 \cdot 46 + 0,13 \cdot 28 + 0,06 \cdot 64 + 0,2 \cdot 60 = 25,92 \text{ кг/кмоль};$$

$$\sum \left(\frac{M}{\mu}\right) = \frac{0,14 \cdot 46}{0,25 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,13 \cdot 28}{0,19 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,06 \cdot 64}{0,18 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,2 \cdot 60}{0,43 \cdot 10^{-4}} =$$

$$= 96,25 \cdot 10^4;$$

$$\mu = 25,92 / 96,25 \cdot 10^4 = 0,269 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2;$$

$$\omega_n = 0,118 \cdot 10^{-10} (1,99 \cdot 10^5)^2 r / (0,269 \cdot 10^{-4}) = 1,74 \cdot 10 \cdot r \text{ м/с.}$$

10. Степень очистки газов:

$$\eta = 1 - e^{\left(\frac{\omega f}{2}\right)},$$

где удельная поверхность осаждения

$$f = \frac{S}{vF} = \frac{242}{0,8 \cdot 7,5} = 40,5 \text{ м}^2/(\text{м}^3/\text{с}),$$

$$\eta_{\text{ФП}} = 1 - e^{-\left(\frac{\omega n f}{2}\right)} = 1 - 2,3\left(\frac{-1,74 \cdot 104 \cdot 40,5}{2}\right) = 1 - 0,011 = 0,989 \text{ или } 98,9 \, \%.$$

Как видно из расчета, степень очистки предполагаемого электрофильтра составляет 98,9 % , в нашем случае подойдет электрофильтр ПГДС-50.

## 2. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Для очистки сточных вод промышленных предприятий от загрязняющих веществ в зависимости от их свойств и свойств очищаемой жидкости используют различные методы очистки: механические, физико-химические, биохимические, включающие в себя аэробные и анаэробные методы очистки. В зависимости от того, какой метод выбран для каждого конкретного случая, применяются различные по конструкции и принципу действия аппараты.

Аппараты механической очистки сточных вод подразделяют на следующие группы:

1. *Отстойники*. В этих очистных сооружениях эффект очистки сточных вод от загрязняющих веществ, находящихся во взвешенном состоянии, достигается в результате использования осаждения под действием силы тяжести и центробежных сил. К сооружениям, работающим по принципу отстаивания, относятся: песколовки и отстойники. К первым относятся горизонтальные и тангенциальные песколовки и специальные – аэрируемые песколовки для предприятий целлюлозного профиля. Отстойники в зависимости от направления движения жидкости подразделяются на горизонтальные, радиальные и вертикальные. В системах общезаводских очистных сооружений они прежде всего разделяются на первичные – перед дальнейшей физико-химической или биологической очисткой и на вторичные, третичные – после каждой ступени биологической очистки.

2. *Фильтры*. В аппаратах этой группы обезвреживание сточных вод осуществляется при пропускании очищаемой воды через пористые фильтровальные материалы. К ним относятся фильтры: тканевые, из волокнистых материалов; сетчатые фильтры – барабанные сетки и микрофильтры; сита и фракционаторы, решетки; кассетные



фильтры, с насыпным слоем зернистого материала, из пористой пластмассы, керамики, металлокерамики и других материалов. Фильтры используются, когда необходимо добиться более высокой степени очистки сточных вод.

3. *Напорные флотаторы*. Принцип их действия основан на флотации (способности поверхности частиц взвеси ЗВ образовывать флококомплексы с пузырьками газа).

Аппараты физико-химической очистки сточных вод включают абсорберы, адсорберы, аппараты обратного осмоса и ультрафильтрации, кристаллизаторы и аппараты, работающие на ионном обмене – катионитовые фильтры и ионитовые фильтры смешанного действия.

Аппараты биохимической очистки сточных вод предприятий включают: очистные сооружения с прикрепленной микрофлорой – биофильтры и биодиски и системы очистки с активным илом как аэробные, так и анаэробные – аэротенки, аэрируемые пруды, анаэробные сбразиватели.

## **2.1. Очистка сточных вод отстаиванием**

Принцип действия аппаратов данного типа основан на гравитационном осаждении взвешенных твердых частиц загрязняющих веществ, диспергированных в отстаиваемой жидкости под действием силы тяжести, имеющих плотность больше или меньше плотности воды. В первом случае они опускаются на дно сооружения, во втором – всплывают к поверхности жидкости. При отстаивании сточных вод получают два продукта: верхний (осветленная жидкость, которая сливается, декантируется из аппарата) и нижний (шлам или отстой загрязняющих веществ). При повышении температуры вязкость жидкостей уменьшается, поэтому отстаивание целесообразно проводить при повышенных температурах отстаиваемой жидкости.

К сооружениям, работающим по принципу отстаивания, относятся отстойники и песколовки. Отстойники широко применяются на предприятиях, так как просты в эксплуатации, обеспечивают вполне приемлемый уровень очистки сточных вод, не требуют высоких эксплуатационных затрат. Их используют для выделения из сточных вод взвешенных загрязняющих веществ любого происхождения – минеральных или органических и любой плотности.

Отстойники подразделяются на горизонтальные, радиальные и вертикальные; периодические, полунепрерывные и непрерывного дей-

ствия. Чтобы ускорить отвод шлама и поднять производительность, отстойники оснащаются гребками центрального или периферийного привода. Песколовки применяются для выделения из сточных вод предприятий тяжелых примесей минерального происхождения (преимущественно песка, отсюда и название) до очистки от более легких органических взвешенных веществ в отстойниках. Принцип разделения взвеси в них основан на разнице гидравлических крупностей минеральной и органической взвеси в силу меньшей плотности последней.

По направлению движения воды песколовки подразделяют на горизонтальные с прямолинейным и круговым движением воды, на аэрируемые и тангенциальные – с винтовым (вращательно-поступательным) движением воды.

### Примеры задач по данному разделу

**Задача 11.** Расчет отстойника для выделения из сточных вод грубодисперсных частиц, механических примесей (взвешенные вещества) и нефтепродуктов.

*Исходные данные:*  $\rho_c = 998 \text{ кг/м}^3$  – плотность среды (воды), где происходит осаждение;  $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$  – плотность частиц, подлежащих осаждению;  $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3} \text{ мПа} \cdot \text{с}$  – коэффициент динамической вязкости;  $d = 1,38 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  – диаметр частиц, подлежащих осаждению.

*Решение.*

1. Найдем скорость осаждения:

$$\omega_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_c)g}{18 \mu_c} = \frac{(1,38 \cdot 10^{-7})^2 (1500 - 998) 9,81}{18 \cdot 1,005 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 5,15 \cdot 10^{-7} \text{ м/с},$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

2. Проверим значение критерия Рейнольдса (Re):

$$\text{Re} = \frac{\omega_{oc} \cdot d \cdot \rho_c}{\mu_c} = \frac{5,15 \cdot 10^{-7} \cdot 1,38 \cdot 10^{-6} \cdot 998}{1,005 \cdot 10^{-3}} = 7,1 \cdot 10^{-7} < 0,2.$$

3. Найдем действительную скорость осаждения:

$$\omega_c = 0,5 \cdot \omega_{oc} = 0,5 \cdot 5,15 \cdot 10^{-7} = 2,57 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}.$$

4. Площадь отстойника составляет

$$F_{oc} = \frac{G_H (1 - \frac{c_K}{c_H})}{3600 \cdot \rho_c \cdot \omega_{oc}} = \frac{72 (1 - \frac{15}{200})}{3600 \cdot 998 \cdot 2,57 \cdot 10^{-7}} = 71,3 \text{ м}^2.$$

Для необходимого осаждения принимаем площадь отстойника  $72 \text{ м}^2$ . Стандартный отстойник, удовлетворяющий данным параметрам, имеет следующие габаритные размеры:

- рабочая глубина –  $1,15 \text{ м}$ ;
- ширина (одной секции) –  $2 \text{ м}$ ;
- длина –  $18 \text{ м}$ ;
- количество секций –  $2$ ;
- производительность –  $72 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- продолжительность отстаивания –  $1,15 \text{ ч}$ .

### Задача 12. Расчет первичных отстойников.

Рассчитать вертикальные первичные отстойники по следующим условиям: расчетный расход стоков  $285 \text{ м}^3/\text{ч}$ , проточная скорость  $0,7 \text{ мм/с}$ , время отстаивания  $1,5 \text{ ч}$ .

*Решение.*

1. Объем рабочей части отстойника

$$W = q \cdot t = 285 \cdot 1,5 = 427,5 \text{ м}^3.$$

2. Высота рабочей части отстойника

$$H = V \cdot t = 0,0007 \cdot 1,5 \cdot 3600 = 3,8 \text{ м}.$$

3. Площадь живого сечения

$$F = \frac{W}{H} = \frac{427,5}{3,8} = 112,5 \text{ м}^2.$$

4. Диаметр отстойника

$$D = \sqrt{\frac{4(F + f)}{n}} = \sqrt{\frac{4 \cdot (112,5 + 2,7)}{6}} = 8,8 \approx 9 \text{ м},$$

где  $f$  – площадь живого сечения центральной трубы:

$$f = \frac{q}{V_{\text{центр тр}}} = \frac{285}{0,03 \cdot 3600} = 2,7 \text{ м}^2,$$

где  $V_{\text{центр тр}}$  – скорость потока жидкости в трубе.

5. Принимаем вертикальный первичный отстойник  $d = 9 \text{ м}$  с высотой рабочей части  $3,8 \text{ м}$ .

6. Суммарная площадь отстойников

$$N_s = \frac{936}{3600 \cdot 0,0007} = 374 \text{ м}^2.$$

7. Количество осадка, выделившегося при отстаивании:

$$Q = \frac{q_w (C_{\text{пос}} - C_{\text{осв}})}{(100 - W_{\text{осв}}) \rho_{\text{ос}} \cdot 10^4} = \frac{285 (113 - 59)}{(100 - 95) 1,04 \cdot 10^4} = 0,3 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $q_w$  – расход сточной воды, м<sup>3</sup>/ч;

$W_{ос}$  – влажность осадка, %;

$\rho_{ос}$  – плотность осадка, кг/м<sup>3</sup>.

8. Эффект задержания взвешенных частиц

$$\psi = \frac{C_{пос} - C_{осв}}{C_{пос}} 100 \% = \frac{113 - 59}{113} 100 \% = 48 \%,$$

где  $C_{пос}$  – концентрация взвешенных веществ в поступающей воде, мг/л;

$C_{осв}$  – концентрация взвешенных веществ в осветленной воде, мг/л.

### Задача 13. Расчет вертикальных вторичных отстойников.

Рассчитать вертикальный вторичный отстойник при следующих условиях: расчет при часовом расходе стоков 936 м<sup>3</sup>/ч или 260 л/с; время отстаивания 1,5 ч.

*Решение.*

1. Объем рабочей части отстойника

$$W = q \cdot t = 936 \cdot 1,5 = 1404 \text{ м}^3.$$

2. Высота рабочей части отстойника

$$H = V \cdot t = 0,0005 \cdot 1,5 \cdot 3600 = 2,75 \text{ м}.$$

3. Диаметр отстойника

$$D = \sqrt{\frac{4(F + f)}{n}} = \sqrt{\frac{4 \cdot (510,5 + 8,6)}{8}} = 16,11 \approx 16 \text{ м},$$

где  $f$  – площадь живого сечения центральной трубы:

$$f = \frac{q}{V_{\text{центр тр}}} = \frac{936}{0,03 \cdot 3600} = 8,66 \text{ м}^2,$$

где  $V_{\text{центр тр}}$  – скорость потока жидкости в трубе.

4. Принимаем вертикальный первичный отстойник  $d = 16$  м с высотой рабочей части 2,7 м.

5. Количество осадка, выделившегося при отстаивании:

$$Q_{\text{ил}} = \frac{L_i \cdot q_{\text{сут}}}{100} = \frac{45,6 \cdot 6840}{100} = 3119,04 \text{ м}^3/\text{сут или } 129,96 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

### Задача 14. Расчет песколовок

Произвести гидравлический расчет горизонтальной песколовки при следующих условиях: расчетный расход 260 л/с, время движения воды в песколовке 30 с, скорость движения воды 0,3 м/с.

*Решение.*

1. Длина песколовки рассчитывается исходя из скорости потока воды и времени движения в аппарате:

$$L = u \cdot \tau = 0,3 \cdot 30 = 9 \text{ м},$$

где  $u$  – скорость движения воды, м/с;

$\tau$  – время движения воды в песколовке, с.

2. Площадь сечения песколовки при заданном значении расхода сточных вод  $Q$ , м<sup>3</sup>/с:

$$F = Q/u = 0,26/0,3 = 0,87 \text{ м}^2.$$

3. Соотношение ширины  $B$  и глубины  $H$  в песколовках принимается 1 : 2, тогда  $H = 2B$ , ширина песколовки:

$$B = \sqrt{F/2} = \sqrt{0,867/2} = 0,66 \text{ м},$$

$$H = 1,32 \text{ м}.$$

## 2.2. Очистка сточных вод фильтрованием

При фильтровании жидкость (сточные воды) протекает через пористую перегородку, которая задерживает твердые частицы. Накапливающийся осадок представляет, в отличие от текучего шлама отстаивников, неподвижную массу с влажностью 7–20 %. Таким образом, фильтрование всегда дает более полное обезвоживание осадка и более чистую осветленную жидкость (фильтрат), чем отстаивание.

Выбор материала фильтровальных перегородок зависит от размера частиц в пульпе и требуемой чистоты фильтрата, коррозионной активности пульпы, способа фильтрования и т. д. При фильтровании нейтральных и слабощелочных сред чаще применяются хлопчатобумажные ткани (фильтродиагональ, фильтробельтинг), кислых сред – шерстяные (грубошерстные сукна). Благодаря ворсистому строению ткани способны задерживать частицы, размеры которых меньше размеров пор ткани. В качестве материала для фильтровальных перегородок применяются также металлические сетки, синтетические волокна (капрон, хлорин, нитрон, лавсан, пенополистирол и т. д.), пористая резина, асбестовая и стеклянная ткань и др.

При фильтровании пульп, содержащих очень мелкие частицы (менее 1 мкм), применяют «намывные» фильтровальные перегородки из бумажной массы, активированного угля, асбеста и других материалов, которые адсорбируют на своей поверхности эти мелкие частицы.

Поверхностное фильтрование реализуется в фильтрах с намывным слоем, сетчатых и тканевых фильтрах, в ситах и фракционаторах, решетках. Фильтрование с закупориванием пор фильтровальной перегородки используется в фильтрах с загрузкой, в частности с зернистой.

### Примеры задач по данному разделу

**Задача 15.** Расчет фильтра с пенополистирольной загрузкой.

*Исходные данные:* полезная суточная производительность

$Q_{\text{п}} = 14000 \text{ м}^3/\text{сут}$ , продолжительность работы станции в течение суток  $T = 24 \text{ ч}$ , расчетная скорость фильтрования при нормальном режиме  $V_{\text{н.р}} = 10 \text{ м/ч}$ , число промывок фильтров в сутки  $n_{\text{п}} = 1$ , интенсивность промывки  $g_{\text{п}} = 10 \text{ с/м}^2$ , время промывки  $t = 0,08 \text{ ч}$ , площадь промывочного фильтра  $f_0 = 15 \text{ м}^2$ .

*Решение.*

1. Суммарная площадь фильтра

$$F = \frac{Q_{\text{п}}}{V_{\text{н.р}} (T - t \cdot n_{\text{п}}) - 3,6 n_{\text{п}} t \cdot g_{\text{п}}} = \frac{14000}{10 (24 - 0,08 \cdot 1) - 3,6 \cdot 1 \cdot 0,08 \cdot 10} = 62 \text{ м}^2.$$

2. Объем промывочной воды, необходимый для промывки одного фильтра:

$$W_{\text{п}} = 3,6 \cdot g_{\text{п}} \cdot t \cdot f_0 = 3,6 \cdot 10 \cdot 0,08 \cdot 15 = 60 \text{ м}^3.$$

3. Общая высота корпуса фильтра

$$H_{\text{ф}} = h_0 + \Delta h + D_{\text{к}} + \sum_{i=1}^{n_i} [l_i(l + e_i) + h_{ab}],$$

где  $h_0$  – начальная потеря напора в загрузке, м:

$$h_0 = \rho_{\text{ж}} \cdot v_{\text{н}}^3 \cdot \eta_{\text{э}} \cdot L / (\mu g m_0 \text{Re}_{\text{э}}),$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$v$  – скорость фильтрования;  $v = 2,8 \text{ см/с}$ ;

$\text{Re}_{\text{э}}$  – эквивалентное число Рейнольдса;  $\text{Re}_{\text{э}} = 0,83$ ;

$\eta_{\text{э}} = 5,2$  – коэффициент сопротивления плавающей загрузки;

$\mu = 1,15 \cdot 10^{-3}$  – динамическая вязкость, Па·с;

$m_0 = 0,39$  – пористость загрузки;

$L = 1,2 \cdot 10^2$  – толщина фильтрующего слоя, м;

$g$  – ускорение свободного падения.

$$h_0 = \frac{1 (2,8)^3 5,2 \cdot 1,2 \cdot 10^2}{1,15 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 0,39 \cdot 0,83} = 0,37 \text{ м.}$$

$\Delta h = 0,2$  м – превышение стенки корпуса фильтра над максимальным уровнем воды в нем.

4. Диаметр коллектора нижней сборно-распределительной системы

$$D_K = \sqrt{\frac{4W_{\Pi}}{\pi u_K t_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 45}{3,14 \cdot 2 \cdot 300}} = 0,30 \text{ м,}$$

где  $W_{\Pi} = 45 \text{ м}^3$  – объем промывной воды;

$u_K = 2 \text{ м/с}$  – скорость движения воды в коллекторе при промывке фильтра;

$t_{\Pi} = 300 \text{ с}$  – время промывки фильтра;

$l_i = 1,2 \text{ м}$  – толщина  $i$ -го слоя загрузки в плотном состоянии;

$e_i = 1,92 \text{ м}$  – относительное расширение слоя загрузки при промывке;

$h_{ab} = 0,2 \text{ м}$  – расстояние между нижней границей расширенного слоя загрузки верхнего яруса и лежащим ниже ярусом фильтрующего слоя;

$n_i = 1$  – число ярусов зернистого слоя.

5. Расчетная высота фильтра составит

$$H_{\Phi} = 0,37 + 0,2 + 0,30 + 1,2 (1 + 1,02) + 0,2 = 4,4 \text{ м.}$$

6. Количество необходимых фильтров

$$K_{\Phi} = \frac{142}{128 \cdot 0,01733 + 142 \cdot 0,767 + 0,21 \cdot 142 + 154 \cdot 0,00567} = 1.$$

**Задача 16.** Расчет песчаных фильтров.

*Исходные данные:* число фильтров  $N = 12$ , при  $N < 20$   $n_p = 2$ ; загрузка – кварцевый песок с диаметром частиц 0,7–1,6 мм при высоте слоя 1300 мм, гравий при высоте слоя 200 мм. Скорость фильтрования  $V_{\Phi} = 10 \text{ м/ч}$ .

*Решение.*

1. Расчетная скорость фильтрации

$$V_p = V_{\Phi} \cdot (N - n_p) / N,$$

где  $V_{\Phi}$  – скорость фильтрования;

$n_p$  – число фильтров в ремонте.

$$V_p = 10 \cdot (12 - 2) / 12 = 8 \text{ м/ч.}$$

2. Суммарная площадь фильтров

$$F = Q / (24 (V_p - n) \cdot V_p \cdot T),$$

где  $Q$  – производительность фильтров;

$T$  – продолжительность промывки;

$n$  – число промывок в сутки;

$$F = 68000 / (24 (8 - 1) \cdot 8 \cdot 0,3) = 432 \text{ м}^2.$$

3. Принимаем фильтр размерами 6х6 ( $f = 36 \text{ м}^2$ ), тогда число фильтров  $N = F / f$ .

$$N = 432 / 36 = 12.$$

4. Общая высота фильтра

$$H = H_3 + H_B + h_c + d_k,$$

где  $H_3$  – высота фильтрующей загрузки, 1,3 м;

$H_B$  – высота слоя над поверхностью загрузки, 2 м;

$h_c$  – превышение строительной высоты над расчетным уровнем воды принимается 0,5 м;

$d_k$  – диаметр трубчатого дренажа.

$$H = 4,6 \text{ м.}$$

5. Диаметр коллектора трубчатого дренажа определяется исходя из скорости движения воды в нем в ходе промывки:

$$d_k = \sqrt{4 \cdot q_{\text{пр}} / \pi \cdot V_k},$$

где  $q_{\text{пр}}$  – расход промывной воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$q_{\text{пр}} = I \cdot f / 1000 = 15 \cdot 36 / 1000 = 0,54 \text{ м}^3/\text{с};$$

$V_k$  – скорость движения воды в коллекторе:

$$V_k = 1 - 1,2 = 0,2 \text{ м/с.}$$

$$d_k = \sqrt{(4 \cdot 0,54) / (3,14 \cdot 1,2)} = 0,8 \text{ м.}$$

По результатам расчета устанавливаем 12 фильтров размерами 6 х 6 м.

### **Задача 17. Расчет решеток.**

Рассчитать решетки для подводящего коллектора, который имеет  $d = 50 \text{ мм}$ , уклон 0,01, давление 0,48 атм.

*Решение.*

Расчет решеток сводится к определению числа зазоров  $n$ , ширины решетки  $\beta$  и потерь напора  $\Delta p$  по формуле:

$$N = 1,05 \left[ \frac{Q_v}{B \cdot H \cdot W_{\text{п}}} \right],$$

где  $Q_v$  – объемный расход сточной воды;

$B$  – ширина прозора (принимается в пределах 5–25 мм);



$W_{\text{п}}$  – скорость движущей сточной воды в прозорах (в пределах 0,8–1 м/с).

1. Найдем ширину решетки:

$$\beta = B \cdot N \cdot \delta \cdot (N - 1),$$

где  $\delta$  – толщина стержня.

2. Найдем потери напора:

$$\Delta p = \frac{\xi \cdot K \cdot P \cdot W^2}{2},$$

где  $W$  – скорость в канале перед решеткой (0,7–0,8 м/с);

$K$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления решетки в процессе осаждения в ее зазорах примесей сточных вод, принимается равным 2–3;

$\xi$  – коэффициент местного сопротивления решетки:

$$\xi = \beta \left( \frac{\delta}{B} \right)^{3/4} \sin \alpha;$$

$\beta$  – коэффициент, характеризующий форму поперечного сечения стержней решетки: круглая форма – 1,79; прямоугольная – 2,42;

$\alpha$  – угол наклона решетки к горизонту.

### 2.3. Очистка сточных вод флотацией

Процесс очистки сточных вод от взвешенных загрязняющих веществ флотацией основан на физико-химических свойствах поверхности частиц взвеси, обуславливающих их способность образовывать флотокомплексы с пузырьками газа, чаще всего воздуха, и гравитационных сил, под действием которых флотокомплексы, имеющие плотность меньше, чем у сточных вод, всплывают к поверхности воды, образуя флотопену.

В соответствии со способами получения в воде пузырьков воздуха (или любого другого газа) различают следующие основные способы флотационной очистки сточных вод от взвесей:

1) флотация пузырьками, образующимися в результате механического диспергирования газа в жидкости;

2) флотация пузырьками, образующимися из пересыщенных растворов воздуха в воде;

3) электрофлотация, т. е. флотация пузырьками газов, образующимися при электролизе воды.

Основные аппараты, использующие для очистки сточных вод флотацию, – флотоотстойники (флотоловушки) и их специальный тип –

седифлотеры (имеют две зоны: верхнюю – флотационную и нижнюю – отстойную). В процессе флотации обычно применяют различные реагенты: клей, канифоль, формалин, ксантогенат.

Особенности процесса ограничивают область использования флотации очисткой сточных вод от таких гидрофобных взвесей, как жиры, масла, нефть и т.д. Для выделения из сточных вод мелкодисперсных частиц с гидрофильной флотацией предполагалось использование гидроциклонов-флотаторов, в основе действия которых помимо флотации лежат также центробежные силы. В гидроциклонах-флотаторах центробежные силы возникают во вращающемся потоке, введенном тангенциально.

### Примеры задач по данному разделу

#### Задача 18. Расчет напорного флотатора.

*Исходные данные:* диаметр  $D = 14$  м; высота  $h = 6$  м; расход сточной воды  $G = 6061$  м<sup>3</sup>/ч; время пребывания в отстойной зоне  $t_0 = 10$  ч, высота отстойной зоны  $H_0 = 3$  м; восходящая скорость движения воды  $v = 6$  мм/с.

*Решение.*

1. Рабочий объем напорного флотатора

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} h = \frac{3,14 \cdot 14^2}{4} 6 = 924 \text{ м}^3.$$

2. Время пребывания сточной воды во флотаторе

$$t = \frac{V}{G} = \frac{924}{6061} = 0,16 \text{ ч},$$

за один час проходит  $Q = 924 / 0,16 = 5775$  м<sup>3</sup>/ч.

Принимаем два флотатора.

3. Диаметр флотатора

$$D_{\phi} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q \cdot t_0}{\pi \cdot H_0 \cdot 60}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5775 \cdot 10}{3,14 \cdot 3 \cdot 60}} = 14 \text{ м}.$$

4. Диаметр флотационной камеры

$$D_{\kappa} = 0,6 \sqrt{\frac{Q}{v}} = 0,6 \sqrt{\frac{5775}{6}} = 13,5 \text{ м}.$$

5. Количество выпавшего осадка

$$W_{\text{ос}} = \frac{Q (C - C_1)}{10^{-6}} = \frac{5775 (22 - 5)}{10^{-6}} = 0,1 \text{ т/сут.}$$

Время пребывания сточной воды во флотаторе  $t = 10$  мин.

### Задача 19. Расчет гидроциклона-флотатора.

*Исходные данные:* расход сточной воды  $Q_{\text{ст}} = 3,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , кратность рециркуляции  $k = 55 \%$  (для заданной эффективности очистки), скорость отбора осветленной воды  $V = 1200 \text{ м}^3/\text{ч}$  и гидравлическая крупность частиц, отделяемых под действием центробежных сил,  $1,2 \text{ м/с}$ .

*Решение.*

Основой для расчета являются следующие зависимости:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{аэр}}, \quad (1)$$

$$Q_{\text{общ}} = 0,785 \cdot d^2 \cdot V, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{общ}}$  и  $Q_{\text{аэр}}$  – общий расход и расход аэрированной воды,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$d$  – внутренний диаметр кольцевого желоба, м;

$V$  – скорость отбора осветленной воды, м/ч.

$$Q_{\text{аэр}} = k \cdot Q_{\text{ст}}/100. \quad (3)$$

Подставляя формулу (3) в (1), получим

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{ст}} (1 + k/100), \quad (4)$$

с учетом (4) и (2) получим

$$d = \sqrt{Q_{\text{ст}} (1 + k/100) / (0,785 \cdot V)}. \quad (5)$$

1. Внутренний диаметр кольцевого желоба

$$d = \sqrt{3,5 (1 + 55/100) / (0,785 \cdot 9,87)} = 0,841 \text{ м.}$$

2. По формуле (СНиП 2.04.03-85) рассчитываем удельную гидравлическую нагрузку:

$$q = 3,6 \cdot 1,98 \cdot 1,2 = 10,01 \text{ м}^3/(\text{мм}^3 \cdot \text{ч}).$$

3. Определяем площадь зеркала воды:

$$F = \frac{50}{10,01} = 4,998 \text{ м}^2.$$

4. Внешний диаметр

$$D = \sqrt{4,998/0,785} = 1,4 \text{ м.}$$

Из стандартного ряда (СНиП 2.04.03-85) выбираем конструктивные размеры: высота цилиндрической части  $H = 1,55 \text{ м}$ , диаметр впускного патрубка  $d = 120 \text{ мм}$ , угол конуса диафрагмы  $\beta = 60^\circ$ .

## **2.4 . Очистка сточных вод физико-химическими методами (ионный обмен и кристаллизация)**

Физико-химические методы очистки сточных вод многообразны. При их определенном сочетании можно очищать воду любой загрязненности до любой желаемой степени чистоты.

При очистке сточных вод предприятий нашли применение такие физико-химические методы, как нейтрализация, окислительные методы, десорбция, коагулирование и адсорбция, мембранные методы, ионный обмен, кристаллизация и др.

Ионный обмен основан на использовании для очистки сточных вод ионитов, которые представляют собой высокомолекулярные, нерастворимые, но набухающие в воде преимущественно твердые вещества, способные поглощать из растворов электролитов положительные или отрицательные ионы в обмен на эквивалентные количества других ионов, имеющих заряд того же знака.

Продолжительность рабочего цикла ионообменных установок определяется рабочей обменной емкостью ионита. После использования обменной емкости ионита до заданного предела его регенерируют, т. е. обрабатывают соответствующим раствором, в результате чего из ионита удаляются поглощенные ионы, и взамен их вводятся те ионы, которыми ионит был насыщен первоначально.

Помимо синтетических ионитов правильной сферической формы применяют также природные иониты, такие как: глауконитовый песок, различные глины и др. Особое положение занимают электрононообменники редокс-иониты – полимеры, пригодные для осуществления не только ионообменных, но и окислительно-восстановительных процессов.

Важнейшими характеристиками ионитов для практического использования являются: насыпная масса, размер и форма гранул, набухаемость, механическая прочность, скорость процессов ионообменной сорбции и т. д.

Основными аппаратами для работы с ионитами являются напорные и безнапорные катионитовые и анионитовые фильтры. Они используются в водоподготовке для умягчения и обессоливания воды.

Кристаллизация применяется при большом загрязнении сточных вод веществами, способными образовывать кристаллы. Этот способ связан с выпариванием для создания большей концентрации, перемешиванием и охлаждением для образования кристаллов. Основным типом аппаратов, действие которых основано на этом методе, являются кристаллизаторы различных типов.

## Примеры задач по данному разделу

### Задача 20. Расчет кристаллизаторов органических веществ.

Рассчитать кристаллизатор I ступени нафталиновой фракции по следующим данным: размер секции шнекового кристаллизатора – ширина 600 мм, глубина 675 мм, длина 3 м. Эффективная поверхность охлаждения  $3,25 \text{ м}^2$ . Кристаллизуется 60 % 2-метилнафталина, поступающего с температурой  $60^\circ\text{C}$  и охлаждающегося до  $0^\circ\text{C}$ ;  $a_1 = 0,8$ ,  $a_2 = 0,6$ .

*Решение.*

1. Количество кристаллизующегося раствора:

$$G_p = \frac{7,52 \cdot 10^{-3} (1 - 0,6)}{(0,767 - 0,6) + 0,008 \cdot 0,6} = 0,0175 \text{ кг/с.}$$

Известно, что на данной стадии вырабатывается 79 т/год обогащенного продукта. По условию кристаллизатор работает непрерывно 4 месяца в год, значит

$$G_{кр} = 19,5 \text{ т/мес} = 7,52 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с.}$$

2. Количество отводимого тепла:

$$Q = 0,0175 \cdot 2,38 \cdot (60 - 0) = 2,499 \text{ кВт.}$$

3. Определение  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{(60 - 40) - (0 - (-5))}{2,3 \lg \frac{60 - 40}{0 - (-5)}} = 11^\circ\text{C.}$$

4. Поверхность теплопередачи

$$F = \frac{2499}{80 \cdot 11} = 2,84 \text{ м}^2.$$

5. Требуемая длина кристаллизатора

$$L = \frac{2,84}{0,9} = 2,48 \text{ м.}$$

Теплоемкость охладителя (15 %-раствора NaCl):

$$C = 3,553 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

6. Необходимое количество охладителя

$$G_x = \frac{2499}{3,553 (40 - (-5))} = 56,3 \text{ кг/ч.}$$

**Задача 21.** Расчет необходимого числа катионитовых фильтров.

Требуется определить необходимое число типовых катионитовых фильтров в установке для удаления из сточных вод ионов тяжелых металлов при следующих исходных данных: рабочая обменная емкость данного ионита  $\text{РОЕ} = 360 \text{ г·экв/м}^3$ ; расход воды, подлежащей очистке,  $q = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; содержание ионов в подлежащей очистке воде  $C_0 = 6 \text{ г·экв/м}^3$ ; допустимое остаточное содержание ионов в фильтрате  $C_\phi = 0$ .

*Решение.*

1. Скорость фильтрации при эксплуатации ионитовых фильтров первой ступени следует выбрать в пределах от 5 до 25 м/ч. Принимаем  $v = 20 \text{ м/ч}$ .

2. Необходимая суммарная площадь поперечного сечения катионитовых фильтров

$$F = \frac{q}{v} = \frac{120}{20} = 6 \text{ м}^2.$$

3. По каталогам ионитовых фильтров или справочникам выбираем высоту фильтрующего слоя  $h = 2,5 \text{ м}$  и диаметр фильтра  $d = 2 \text{ м}$ .

4. Для одного фильтра площадь поперечного сечения

$$f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ м}^2.$$

5. Объем загрузки одного фильтра

$$w = fh = 3,14 \cdot 2,5 = 7,85 \text{ м}^3.$$

6. Необходимое число таких фильтров (с округлением)

$$n = \frac{F}{f} = \frac{6}{3,14} = 2.$$

7. Суммарный объем загрузки (катионита)

$$W = 2w = 2 \cdot 7,85 = 15,7 \approx 16 \text{ м}^3.$$

8. Фактическая суммарная площадь поперечного сечения фильтров

$$F_\phi = 3,14 \cdot 2 = 6,28 \text{ м}^2.$$

9. Фактическая скорость фильтрации

$$\sigma_\phi = \frac{q}{F_\phi} = \frac{120}{6,28} = 19,3 \text{ м/ч}.$$

10. Продолжительность рабочего периода фильтроцикла

$$t = \frac{W \cdot \text{РОЕ}}{q(c_0 - c_\phi)} = \frac{16 \cdot 360}{120 \cdot 6} = 8 \text{ ч}.$$

11. Число дополнительных фильтров, необходимых для обеспечения непрерывной работы установки, можно рассчитать из соотношения

$$n_{\text{доп}}/n = \tau/t,$$

где  $\tau$  – суммарная продолжительность регенерации и отмывки.

Принимая  $\tau = 4$  ч, получим

$$n_{\text{доп}} = n\tau/t = 4 \cdot 2/8 = 1.$$

Таким образом, общее число ионитовых фильтров в установке равно 3.

**Задача 22.** Расчет катионитового фильтра.

*Исходные данные:* расход обрабатываемой воды  $q_w = 100$  м<sup>3</sup>/ч, число регенераций фильтра  $n = 1$  раз в 10 дней, допустимая суммарная концентрация катионов в очищенной воде  $\sum C^k = 0,34$  г · экв / м<sup>3</sup>, суммарная концентрация катионов в обрабатываемой воде 0,034 г · экв / м<sup>3</sup>.

*Решение.*

1. Рабочая обменная емкость катионита по наименее сорбируемому катиону

$$E_{vc} = \alpha \cdot E_{gen} - K_{ion} \cdot q \cdot \sum C_w = 0,8 \cdot 800 - 0,5 \cdot 3 \cdot 0,1 = 639,5 \text{ г} \cdot \text{экв} / \text{м}^3,$$

где  $\alpha = 0,8$ ;

$$E_{gen} = 800 \text{ г} \cdot \text{экв} / \text{м}^3;$$

$$q = 3;$$

$$K_{ion} = 0,5;$$

$$\sum C_w = 0,1 \text{ г} \cdot \text{экв} / \text{м}^3.$$

2. Объем катионита в водород-катионитовых фильтрах

$$W_{\text{кат}} = 24 \cdot q_w (\sum C_{en} - \sum C_{ex}) / (n_{reg} \cdot E_{vc}) = 24 \cdot 100(0,68 - 0,034) / (0,1 \cdot 639,5) = 11,48 \text{ м}^3.$$

3. Площадь катионитовых фильтров

$$F = W_{\text{кат}} / H = 11,48 / 2,5 = 4,59 \text{ м}^2.$$

Площадь катионитовых фильтров определяется также по формуле:

$$F = q_w / v_f = 100 / 20 = 5 \text{ м}^2,$$

где  $v_f$  – скорость фильтрования, м/ч.

Принимается  $F = 5 \text{ м}^2$ .

## 2.5. Очистка сточных вод биохимическими методами

Биологическая очистка основана на способности микроорганизмов использовать в качестве источника питания загрязняющие вещества сточных вод. Этот метод применяют преимущественно для удаления растворенных органических веществ, но биоокислению могут подвергаться и различные неорганические соединения – аммиак, нитриты, сероводород (эту возможность широко применяют для очистки сточ-

ных вод коксохимического производства). Частично в системах биологической очистки биоокисляются коллоидные и взвешенные вещества, но в основном за счет физико-химических процессов. На биоматериале сорбируются также ионы тяжелых металлов и некоторые токсичные соединения, в частности бенз(α)пирен.

Биологическая очистка включает методы очистки с искусственной микрофлорой (биофильтры, биодиски) и системы с активным илом как аэробные, так и анаэробные (аэротенки, аэрируемые пруды, анаэробные сбраживатели). Наиболее распространена аэробная биологическая очистка в аэротенках и аэрируемых прудах.

В системах аэробной очистки сточных вод доминирующим процессом биологического окисления является аэробное дыхание.

Микроорганизмы аэробных систем объединены в макроколонии (хлопья активного ила, биопленка) и состоят преимущественно из аэробных гетеротрофных бактерий, присутствуют также простейшие (одноклеточные животные), а также коловратки, черви, личинки насекомых, грибы и водоросли.

Аэротенки являются проточными биохимическими реакторами с возвратом биомассы, в которых микроорганизмы находятся в виде хлопьев активного ила.

### Пример задачи по данному разделу

#### Задача 23. Расчет прямоугольного аэротенка.

*Исходные данные:* производительность по стокам  $h = 6061 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; объем –  $19440 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; габаритные размеры:  $a \cdot b = 108 \text{ м} \cdot 36 \text{ м}$ ;  $La = 122$ ,  $Lt = 19$ ; высота слоя воды в аэротенке  $H = 4,5 \text{ м}$ ; коэффициент использования воздуха  $k = 6 \text{ г}/\text{м}^3$ ; интенсивность аэрации  $I = 7,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; скорость в воздуховодах, подающих воздух под аэраторы,  $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$ .

*Решение.*

1. Количество воздуха, необходимого для снижения БПК<sub>20</sub> сточной воды:

$$V = \frac{(La - Lt) Q}{K \cdot H \cdot d} = \frac{(122 - 19) 6061}{6 \cdot 4,5 \cdot 1} = 23,122 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

2. Количество воздуха, необходимого для снижения БПК<sub>20</sub> с  $La$  до  $Lt$  на  $1 \text{ м}^3$  воды:

$$D = \frac{La - Lt}{K \cdot H \cdot d} = \frac{122 - 19}{6 \cdot 4,5 \cdot 1} = 5 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$



3. Объем возвратного активного ила:

$$q = \frac{0,8 \cdot 6061}{1,1 - 0,8} = 3463,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

4. Продолжительность аэрации:

$$t = \frac{2a}{k \cdot I} = \frac{2 \cdot 500}{12 \cdot 7,2} = 11,6 \text{ ч}.$$

5. Количество необходимого воздуха:

$$D' = \frac{2a}{k \cdot H} = \frac{2 \cdot 500}{12 \cdot 4,5} = 18,5 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

6. Концентрация загрязняющих веществ сточных вод в иловой смеси с учетом разбавления возвратным активным илом:

$$a = \frac{aQ + bq}{Q + q} = \frac{500 \cdot 6061 + 30 \cdot 3000}{6061 + 3000} = 334 \text{ мг/г}.$$

7. Требуемое для очистки количество кислорода:

$$G_{O_2} = L \cdot \Delta \text{БПК} = 6061 \cdot 470 = 2848670 \text{ кг/ч} - \text{ на 3 аэротенка,}$$

где  $\Delta \text{БПК} = \text{БПК}_{\text{вх}} - \text{БПК}_{\text{вых}} = 500 - 30 = 470 \text{ мг/л}.$

$$G_{O_2} \text{ на 1 аэротенк: } 2848670 / 3 = 949557 \text{ кг/ч}.$$

8. Требуемое количество воздухоподувок:

$$n_{\text{в}} = \frac{V}{0,576 \cdot L_{\text{вд}}} \frac{V}{0,72 \cdot L_{\text{вд}}} = \frac{12612}{0,576 \cdot 12000} \frac{12612}{0,72 \cdot 12000} = 2,7 \text{ шт}.$$

Принимаем 3 шт., тогда на три аэротенка – 9 шт.

9. Количество аэраторов:

$$n = \frac{G}{Q} = \frac{6061 \cdot 0,14}{18,6 (1 - 0,67 \cdot 1,25)} = 280 \text{ шт}.$$

10. Шаг аэратора в аэротенке:

$$t = \sqrt{\frac{a \cdot b}{n}} = \sqrt{\frac{108 \cdot 36}{280}} = 3,72 \text{ м} \approx 4 \text{ м}.$$

11. Расход воздуха на один аэратор:

$$q = V/n = 12612/280 = 45 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

12. Диаметр аэратора:

$$d = v \cdot q^{-1,33} \cdot 10^4 = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 45^{-1,33} \cdot 10^4 = 0,4 \text{ м}.$$

13. Высота трубы аэратора:

$$H_{\text{тр}} = \frac{10,52 V'}{n \cdot d^{1,3} \cdot q^{0,35} \cdot 87,6} = \frac{10,52 \cdot 19440}{280 \cdot 0,4^{1,3} \cdot 45^{0,35} \cdot 87,6} = 2,5 \text{ м}.$$

14. Степень рециркуляции активного ила:

$$R_i = \frac{a_i}{1000/Y_i - a_i} = \frac{2,25}{1000/105 - 2,25} = 0,31.$$

15. Нагрузка на 1 г беззольного вещества ила в сутки:

$$q_i = \frac{24 (\text{БПК}_{\text{вх}} - \text{БПК}_{\text{вых}})}{a_i(1 - S) r} = \frac{24 (500 - 30)}{2,25 (1 - 0,3) \cdot 3,2} =$$
$$= 2238 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/\text{г}.$$

Окислительная мощность

$$\text{ОМ} = \frac{(\text{БПК}_{\text{исх}} - \text{БПК}_{\text{очищ}}) Q_{\text{сух}}}{1000 W} = \frac{(500 - 30) 145465}{1000 \cdot 17496} =$$
$$= 3,9 \text{ кг } \text{O}_2/\text{м}^3 \cdot \text{сут}.$$

16. Нагрузка по БПК:

$$H = \text{ОМ}/C_{\text{акт ил}} = 3,9/2,25 = 1,7.$$

### 3. УТИЛИЗАЦИЯ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

Интенсивное использование минерального сырья сопровождается образованием большой массы отходов на различных стадиях его переработки – на горных предприятиях, в процессе транспортирования и на перерабатывающих предприятиях. Твердые отходы, которые поступают в окружающую среду, делятся:

- в соответствии с источником образования – на промышленные, сельскохозяйственные и бытовые;
- по составу – на неорганические и органические;
- по вредности – на токсичные и нетоксичные.

Наибольшая масса промышленных отходов приходится на долю горной и горно-химической промышленности, черной и цветной металлургии, металлообрабатывающих отраслей, лесной и деревообрабатывающей промышленности, энергетического хозяйства, химической и смежных отраслей промышленности, легкой и текстильной промышленности. Эти отходы представляют собой отвалы, шлаки, шламы, металлическую стружку и бракованные изделия, отходы лесозаготовительные и лесопиления, золу, резину, пластмассу и т. д.

Урбанизация привела к тому, что в городах на сегодняшний день остро стоит проблема утилизации выбросов городского хозяйства (твердых бытовых отходов – ТБО).

Наиболее рациональным путем использования минерального сырья является создание малоотходных и безотходных технологий, основной принцип которых заключается в следующем: извлекать из

недр как можно меньше лишнего и наиболее полно использовать это лишнее в качестве побочной продукции производства или сырья для ее изготовления.

Твердые отходы в каждом конкретном случае могут использоваться как сырье для изготовления различных материалов и изделий. Например, металлолом является сырьем для получения стали, шлаки и зола – для строительных материалов. При этом уменьшаются затраты на содержание отвалов, высвобождаются занятые отвалами земли, отпадает необходимость добычи и обогащения природного сырья.

Все, что называют отходами, является потенциальным сырьем для других отраслей экономики, т. е. вторичными ресурсами.

Переработка отходов возможна различными методами: грануляцией, брикетированием, агломерацией.

Бытовые отходы сжигаются, подвергаются пиролизу или принимаются к хранению на полигонах.

### **3.1. Агломерация**

Если в ряде производств возможно создание безотходных технологий, исключающих появление вторичных ресурсов, то при добыче руд, горючих ископаемых и их переработке неизбежно образование отходов.

Процессы обогащения сопровождаются образованием большого количества твердых отходов в виде «хвостов» и пыли, уносимых с воздухом аспирационных систем и с газами сушильных установок. Кроме того, в процессе основной технологии производства образуется масса других твердых отходов, например шлаки. В зависимости от вида перерабатываемого сырья возможно использование данных отходов в качестве полуфабрикатов на других стадиях этой технологии либо в других производствах. Улавливание пыли и агломерация ее с возвращаемыми материалами позволяет уменьшить расход перерабатываемого сырья.

Различные шлаки, золы электростанций, фосфогипс – ценное потенциальное сырье для различных строительных материалов и дорожного строительства. Технологическая схема переработки шлаков выбирается в зависимости от их состава и физико-химических свойств (вязкость, плавкость, фазовый состав, структура, электропроводность и т. д.). В промышленности для переработки шлаков используются различные способы фьюмингования, вельцевания и электротермической обработки.

## Пример задачи по данному разделу

**Задача 24.** Расчет количества возвращаемых материалов и отходов, используемых в агломерации.

Определить количество используемых в агломерации возвращаемых материалов и отходов в расчете на 100 кг сухого боксита. Агломерация оборотных материалов (белый шлам, оборотный раствор) и отхода – уловленной пыли производится в барабанной печи при спекании боксита с известняком и кальцинированной содой. В качестве топлива используется пыль кузнецкого угля марки СС.

Составы шихтовых материалов: боксита, белого шлама, оборотного раствора, золы угля, известняка и соды представлены в табл. 6.

*Решение.*

Шихта составляется из условия получения следующих молекулярных соотношений:

$$\text{CaO} / \text{SiO}_2 = 2,0 \text{ и } \text{Na}_2\text{O} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) = 1,0.$$

Количество используемой угольной пыли 25 % от веса сухого боксита  $100 \cdot 0,25 = 25$  кг.

Количество золы, образующейся при сгорании топлива:

$$A^r = \frac{A^d (100 - W^r)}{100} = \frac{11 (100 - 1,5)}{100} = 10,8 \text{ \%}.$$

$$\text{Масса золы } m_{\text{зола}} = 25 \cdot 0,108 = 2,7 \text{ кг.}$$

Рассчитанное количество компонентов золы представлено в табл. 7.

Таблица 6

Составы шихтовых материалов

Шихтовый материал	Содержание компонента, масс. %								
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Прочие
Боксит	50,00	10,00	18,00	2,00	4,00	3,15	—	12,05	0,80
Белый шлам	25,00	20,00	—	—	—	—	23,00	32,00	—
Оборотный раствор	1,10	—	—	—	—	13,20	21,10	64,60	—
Известняк	—	0,80	—	—	50,00	39,20	—	9,50	0,50
Зола топлива	25,00	55,00	7,00	—	4,00	—	—	—	9,00
Кальцинированная сода	—	—	—	—	—	—	57,40	40,60	2,00
Пыль на агломерацию	25,42	6,25	8,52	0,94	11,70	21,00	19,52	5,97	0,68

Количество белого шлама определяется по балансу  $\text{SiO}_2$ , остающегося в спеке после его выщелачивания. Принимается 13 %, а 87 %  $\text{SiO}_2$  уходит в красный шлам. В шихте содержится  $\text{SiO}_2$  из боксита 10 кг, из золы топлива 48 кг, из извести при примерном расходе 45 кг/100 кг боксита:

$$45 \cdot 0,008 = 0,36 \text{ кг.}$$

Всего:

$$10 + 1,46 + 0,36 = 11,84 \text{ кг.}$$

Тогда  $\text{SiO}_2$  в белом шламе:

$$11,84 \cdot 13/100 = 1,54 \text{ кг.}$$

Количество белого шлама:

$$1,54 \cdot 100/20 = 7,7 \text{ кг.}$$

Количество компонентов белого шлама представлено в табл. 7.

Количество известняка, который необходимо вводить в шихту. Содержание в шихте условно свободного  $\text{SiO}_2$ :

$$10 + 1,48 + 1,54 = 13,02 \text{ кг.}$$

Общее количество условно свободной окиси кальция в боксите и золе топлива:

$$4 + 0,11 = 4,11 \text{ кг.}$$

Это количество  $\text{CaO}$  свяжет в двухкальциевый силикат:

$$4,11 \cdot 60/112 = 2,2 \text{ кг } \text{SiO}_2.$$

Остается  $\text{SiO}_2$ :

$$13,02 - 2,2 = 10,82 \text{ кг.}$$

С учетом содержания кварца в извести 0,008 определим количество необходимой извести  $x$ :

$$0,5 \cdot x / (10,82 + 0,008 x) = 112/60 = 2\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 41,7 \text{ кг.}$$

Учитывая низкое содержание  $\text{SiO}_2$ , принимаем ее расход 45 кг. Компоненты извести представлены в табл. 7.

Количество оборотного маточного раствора рассчитывается из количества  $\text{Na}_2\text{O}$ , необходимого для осуществления процесса спекания. Состав раствора, г/л: 12,0  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 210  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 130  $\text{CO}_2$ ; 985  $\text{H}_2\text{O}$ . Плотность 1,337 кг/л.

Общее суммарное извлечение  $\text{Na}_2\text{O}$  в последующих процессах выщелачивания спека, обескремнивания и карбонизации составляет 85 %.

Содержание компонентов в шихте берется из табл. 6.

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 50 + 0,66 + 1,92 = 52,58 \text{ кг;}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 18,0 + 0,19 = 18,19 \text{ кг;}$$

$$\text{TiO}_2 = 2 \text{ кг.}$$

Количество  $\text{Na}_2\text{O}$  на получение метаалюмината натрия:

$$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = 52,58 \cdot 62/102 = 32 \text{ кг};$$

на метаферрит натрия:

$$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = 18,19 \cdot 62/159,6 = 7,05 \text{ кг};$$

на титанат натрия:

$$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{TiO}_2 = 2 \cdot 62/79,9 = 1,55 \text{ кг}.$$

Всего требуется  $\text{Na}_2\text{O}$ :

$$32 + 7,05 + 1,55 = 40,6 \text{ кг}.$$

В оборотной воде уже есть связанный  $\text{Na}_2\text{O}$ . Количество несвязанного  $\text{Na}_2\text{O}$ :

$$210 - 12 \cdot 62/102 = 210 - 7,3 = 202,7 \text{ г/л}.$$

С учетом общего извлечения:

$$40,6 \cdot 0,85 = 34,51 \text{ кг}.$$

Тогда количество оборотного раствора:

$$34,51/0,210 = 164 \text{ л или } 164 \cdot 1,337 = 219 \text{ кг}.$$

В нем связанного  $\text{Na}_2\text{O}$ :

$$7,3 \cdot 164 = 1200 \text{ г}.$$

Свободного  $\text{Na}_2\text{O}$  с раствором:

$$34,51 - 1,2 = 33,31 \text{ кг}.$$

Дополнительно требуется  $\text{Na}_2\text{O}$ , который поступает с кальцинированной содой:

$$40,6 - 33,1 = 7,29 \text{ кг},$$

с учетом  $\text{Na}_2\text{O}$ , содержащегося в белом шламе:

$$7,29 \cdot 1,77 = 5,52 \text{ кг или } 5,52 \cdot 106/62 = 9,45 \text{ кг } \text{Na}_2\text{CO}_3.$$

При содержании в соде 2 % примесей необходимое количество соды составит:

$$9,45 \cdot 100/98 = 9,65 \text{ кг}.$$

Рабочая влажность шихты должна быть 36 %.

При общем весе компонентов:

$$100 + 11,1 + 2,7 + 7,7 + 41,7 + 219 + 9,65 = 391,85 \text{ кг}.$$

Количество влаги:

$$11,1 + 1,77 + 3,90 + 161,3 = 177,13 \text{ кг},$$

$$\text{а необходимо } 0,36 \cdot 391,85 = 141 \text{ кг}.$$

Отсюда необходимо предварительно испарить из маточного раствора  $x$  воды:

$$x/(391,85 - 177,13 + x) = 0,36 \quad x = 121,2 \text{ кг}.$$

Количество компонентов упаренного раствора представлено в табл. 7.

Количество возвращаемой пыли составляет 53,5 кг. Пыль находится в обороте. Количество компонентов представлено в табл. 7.

### 3.2. Сжигание бытовых отходов

Количество образующихся твердых бытовых отходов с каждым годом лавинообразно увеличивается. Это связано не столько с ростом народонаселения, сколько с повышением уровня жизни людей. В разных городах их количество составляет от 200 до 800 кг на человека в год. В их составе бумага, пищевые материалы, ткани, стекло, металл. Свалки занимают сотни квадратных километров.

Одним из решений проблем ТБО является их сжигание, при этом количество этих отходов уменьшается в сотню раз, отпадает необходимость в занятии больших площадей под свалки. Сжигание проводят на валковых колосниках или в барабанных печах, далее дымовые газы подвергаются очистке.

Существуют технологические схемы, позволяющие утилизировать тепло отходящих газов, поскольку большое содержание органических компонентов в ТБО (90 %) обуславливает их высокую теплоту сгорания. ТБО имеют следующий элементный состав, %: С – 51,3; Н – 6,6; N – 0,2; О – 41,7; S – 0,2.

#### Пример задачи по данному разделу

**Задача 25.** Расчет оборудования для обезвреживания ТБО.

Рассчитать оборудование для обезвреживания твердых бытовых отходов сжиганием по следующим исходным данным: расход ТБО 100000 т/год, зольность 15 %, содержание неорганических веществ – 10 %.

*Решение.*

Элементный состав ТБО, %: С = 51,3; Н = 6,6; N = 0,2; О = 41,7; S = 0,2.

Рассчитывается  $(Q_n^p)_{\text{общ}}$  для всей массы ТБО:

$$(Q_n^p)_{\text{общ}} = 81C_{\text{общ}}^p + 300H_{\text{общ}}^p - 26(O_{\text{общ}}^p - S_{\text{общ}}^p) - 54N_{\text{общ}}^p = \\ = 19600 \text{ кДж/кг или } 4690 \text{ ккал/кг.}$$

Удельная теплота сгорания с учетом 3% недожега и 3% теплопотерь  $Q_n^p = 4410 \text{ ккал/кг или } 18420 \text{ кДж/кг.}$

Требуется рассчитать массу воздуха, теоретически необходимого для горения 15 тонн отходов в час:

$$L_0 = (0,115C^p + 0,345H^p + 0,043(S^p - O^p)) 15000 = 6,4 \cdot 15000 = \\ = 96 \text{ т/кг} = 96000 \text{ кг/кг.}$$

Таблица 7

Компоненты шихты для агломерации боксита с утилизацией оборотных материалов и отхода \*

Состав	Всего		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Прочие
	кг	%									
Боксит (влажный)	111,10	33,0	50,00	10,00	18,00	2,00	4,00	3,15	–	(12,05) 11,10	0,80
Известняк	41,70	12,4	–	0,34	–	–	20,85	16,35	–	3,96	0,20
Белый шлам	7,70	2,3	1,92	1,54	–	–	–	–	1,77	(0,70) 1,77	–
Оборотный раствор	163,07	48,6	1,80	–	–	–	–	21,50	34,40	105,57	–
Сода кальцинированная	9,65	2,9	–	–	–	–	–	3,92	5,54	–	0,19
Зола топлива	2,70	0,8	0,66	1,48	0,19	–	–	0,11	–	–	0,26
Итого:	335,92	100,0	54,38	13,36	18,19	2,00	24,96	44,92	41,71	(12,75) 122,20	1,45

\* В скобках указана связанная влага.



Объем теоретически необходимого воздуха:

$$V_0 = 0,089C^p + 0,265H^p + 0,33(S^p - O^p) = 4,95 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_0 = 4,95 \cdot 15000 = 74300 \text{ м}^3/15 \text{ т.}$$

Объем теоретически необходимого воздуха рассчитывается по формуле с учетом коэффициента избытка воздуха:

$$\alpha = 1,6 - 2;$$

$$V_0 = 1,08 \cdot \alpha \cdot Q_H^p \cdot 15000/1000 = 74200 \text{ м}^3/15 \text{ т при } \alpha = 1,6;$$

$$\alpha = V_B / V_0,$$

где  $V_B$  – фактический расход воздуха, необходимый для сжигания 15 тонн ТБО.

$$V_B = \alpha \cdot V_0 = 1,6 \cdot 74200 = 118880 \text{ м}^3/15 \text{ т.}$$

Продукты сгорания, их состав и количество:

$$V_r = (0,1 + 1,08\alpha) \cdot Q_H^p/1000 = 1495000 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $V_r$  – объем дымовых газов.

Содержание отдельных составляющих для дымовых газов:

$$V_{CO} = \frac{1,86 \cdot C^p}{V_r} = 15000 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{N_2} = \frac{79 \cdot \alpha \cdot V_0}{V_r} = 115500 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{O_2} = \frac{21(\alpha-1)V_0}{V_r} = 16500 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{H_2O} = \frac{100(9H^p + W^p)V_0}{V_r \cdot 80,5} = 3000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Температура уходящих газов после топочной камеры составляет 800–1000 °С. Для использования тягодутьевых и пылеулавливающих устройств, установленных в МСУ, требуется снизить температуру до 250–300 °С.

$$V_{ОВ} = \frac{V_r(t_r - t_{см})}{(t_{см} - t_в)} = \frac{149500(900 - 250)}{(250 - 25)} = 431890 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

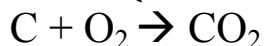
Такой объем воздуха требуется для охлаждения 149500 м<sup>3</sup>/ч уходящих газов, т. е. приблизительно в 4 раза больше.

Учитывая, что зольность ТБО по условию 15 %, рассчитывается элементный состав ТБО, подвергающийся горению, %: С = 48,5; Н = 4,95; N = 0,18; О = 31,33; S = 0,16.

Расчет  $Q_p^c$  (т.е. на сухую массу) с учетом зольности:

$$\begin{aligned} Q_p^c &= 81C_{\text{общ}}^c + 300H_{\text{общ}}^c - 26(O_{\text{общ}}^c - S_{\text{общ}}^c) - 6 \cdot 9N_{\text{общ}}^c = \\ &= 81 \cdot 48,5 + 300 \cdot 4,95 - 26(0,16 - 31,33) - 54 \cdot 4,95 = \\ &= 4300 \text{ ккал/кг.} \end{aligned}$$

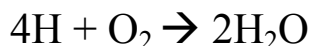
$$L_0 = 0,115C^p + 0,345H^p + 0,043(S^p - O^p) = 6,3 \text{ кг/кг.}$$



Предполагаемый расчет С на 1 кг:

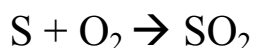
$$0,485 \text{ кг} = m_C \rightarrow 0,485 \text{ кг} / 12 \text{ кг/моль} = 0,04 \text{ моль.}$$

$$V_{O_2} = 0,04 \text{ моль} \cdot 22,4 \text{ м}^3/\text{моль} = 0,82 \text{ м}^3; V_{CO_2} = 0,72 \text{ м}^3.$$



$$0,0495 \text{ кг} = m_H \rightarrow 0,495 \text{ кг} / 2 \text{ кг/моль} = 0,0248 \text{ моль.}$$

$$V_{O_2} = 0,0248 \text{ моль} \cdot 22,4 \text{ м}^3/\text{моль} / 2 = 0,277 \text{ м}^3; V_{H_2O} = 0,554 \text{ м}^3.$$



$$0,3133 \text{ кг} = m_S \rightarrow 0,3133 \text{ кг} / 32 \text{ кг/моль} = 0,0098 \text{ моль.}$$

$$V_{O_2} = 0,0098 \text{ моль} \cdot 22,4 \text{ м}^3/\text{моль} = 0,22 \text{ м}^3; V_{SO_2} = 0,22 \text{ м}^3.$$

$$\Sigma O_2 = 1,019 \text{ м}^3 / 0,21;$$

$$m_{\text{воздуха}} = 4,85 \text{ м}^3;$$

$$V_{N_2} = 4,85 - 1,019 = 3,8 \text{ м}^3.$$

Теоретический расход  $O_2$  (с учетом  $O_2$  в ТБО) составляет 0,99.

Реальный расход воздуха  $0,99 / 0,21 = 4,75 \text{ м}^3$ ;

$$V_{N_2} = 4,75 - 0,99 = 3,76 \text{ м}^3.$$

### 3.3. Захоронение твердых бытовых отходов

Органические вещества, входящие в состав ТБО, в анаэробных условиях и в присутствии микроорганизмов подвергаются брожению, перепревают, при этом выделяется газ, который по теплоте сгорания близок к природному газу, так как в нем содержится до 50 % метана.

Для утилизации ТБО с целью использования их для получения газа или для захоронения используются полигоны, отличающиеся от свалок конструктивными особенностями. Полигоны размещают, как правило, в отработанных карьерах, причем нижняя часть должна находиться выше уровня грунтовых вод. Кроме этого, дно карьера выкладывается водоупорными материалами, например глинистыми грунтами, гудроном. Для откачки из тела полигона вод используется дренажная система, состоящая из дырчатых труб, укладываемых на дно карьера, и сборного коллектора.

ТБО укладываются послойно, уплотняются специальной техникой, при этом уплотненные слои мусора перемежаются слоями грунта – промежуточной изоляцией. Такой образующийся «слоеный пирог» может иметь высоту над уровнем земли до 15–20 м. Верхняя часть

полигона покрывается дерном либо землей, засаживается растительностью. Для откачки образующегося в теле полигона биогаза в процессе заполнения карьера оборудуется газокolleкторная система.

### Пример задачи по данному разделу

**Задача 26.** Расчет показателей полигона для захоронения бытовых отходов.

Рассчитать показатели полигона для захоронения бытовых отходов. Количество отходов 200 000 т, высота укладки 15 м, насыпная плотность ТБО 200 кг/м<sup>3</sup>, плотность укладки 800 кг/м<sup>3</sup>. Полигон размещается в отработанном карьере объемом 100 000 м<sup>3</sup>.

При решении задач справочные величины выбираются по данным указанных литературных источников.

*Решение.*

Для обоснования требуемой площади участка полигона рассчитывается количество ТБО, которое будет доставлено на него в расчетное время 20 лет, м<sup>3</sup>:

$$E_T = (k_2/k_1) Y,$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий уплотнение ТБО в процессе эксплуатации;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий объем промежуточных и окончательных наружных изолирующих слоев грунта;

$Y$  – объем неуплотненных ТБО, м<sup>3</sup>:

$$Y = M/\rho,$$

где  $\rho$  – начальная плотность ТБО в неуплотненном состоянии (0,2 т/м<sup>3</sup>);

$$Y = 200000/0,2 = 10^6 \text{ м}^3;$$

$$E_T = \left(\frac{1,22}{4}\right) 10^6 = 3,05 \cdot 10^5 \text{ м}^3.$$

Так как полигон располагается в отработанном карьере 100х100х10 м общим объемом  $V_k = 100\,000 \text{ м}^3$ , что в три раза меньше объема захороняемых отходов, то полигон проектируется по высотной схеме. Высоту полигона над уровнем участка земли  $H$  определяют их условия заложения внешних откосов 1:4 и необходимости иметь размеры верхней площадки, обеспечивающие безопасную работу мусоровозов и уплотняющей техники:

$$H = (Ш - Ш_{\text{в}}) / 8, \text{ м},$$

где  $Ш$  – ширина участка складирования.

Минимальная ширина верхней площадки  $\Pi_v$  определяется удвоенным радиусом разворота мусоровозов, равным  $9 \cdot 2 = 18$  м, и соблюдением правил размещения мусоровозов не ближе 10 м от откосов. Минимальная ширина составляет

$$18 + 10 \cdot 2 = 38 \text{ м.}$$

Для удобства работы техники принимаем ширину верхней площадки 60 м. Площадь ее  $C_2 = 60^2 = 3600 \text{ м}^2$ .

В качестве наиболее экономичной формы рассчитывается полигон в виде правильного квадрата. Глубина котлована остается  $H_k = 10$  м, а сторона на уровне земли принимается 145 м.

При этом с учетом уклона 1: 0,5 для глинистых грунтов, на котором располагается полигон, сторона днища котлована и его площадь соответственно

$$\Pi_k = 145 - 10 / (0,5 \cdot 2) = 135 \text{ м;}$$

$$C_3 = 135^2 = 18225 \text{ м}^2.$$

Площадь полигона на уровне земли

$$C_1 = 145^2 = 21025 \text{ м}^2.$$

С учетом внешних откосов 1:4 и ширины верхней площадки 60 м получаем высоту полигона над уровнем земли:

$$H = (145 - 60) / 8 = 10 \text{ м.}$$

Фактическую вместимость полигона  $E_\phi$  с учетом уплотнения рассчитываем по формуле усеченной пирамиды:

$$\begin{aligned} E_\phi &= 1/3(C_1 + C_2 + \sqrt{C_1 C_2})H + 1/3(C_1 + C_3 + \sqrt{C_1 C_3}) H_k = \\ &= 1/3(21\,025 + 3600 + \sqrt{21\,025 \cdot 3600})10 + 1/3(21\,025 + \\ &+ 18\,225 + \sqrt{21\,025 \cdot 18\,225}) 10 = 3,07 \cdot 10^5 \text{ м}^3, \end{aligned}$$

что превышает теоретический объем на 1 %.

Потребность в изолирующем материале  $B_r$  определяется по формуле:

$$B_r = E_\phi (1 - 1/k_2) = 3,03 \cdot 10^5 (1 - 1/1,22) = 55\,360 \text{ м}^3.$$

Изолирующим материалом является отрытый из котлована грунт. Изъятый грунт размещается в кавальерах по периметру полигона.

Объем грунта после достижения котлованом проектных размеров составит

$$\begin{aligned} B_{\text{ги}} &= (C_3 + C_1) / 2H_k - B_k = (18\,225 + 21\,025) / (2 \cdot 10) - 100\,000 = \\ &= 96\,200 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Оставшаяся часть грунта  $B_{\text{ост}} = 96\,200 - 55\,360 = 40\,840 \text{ м}^3$  используется для наружной изоляции полигона при его закрытии в виде покрытия слоем толщиной 1 м.

Заполнение полигона производится участками – «картами» шириной 5 м и длиной 27 м.

ТБО уплотняются слоями по 0,5 м тяжелыми бульдозерами и катком-уплотнителем. При достижении высоты слоя уплотненных ТБО в 2 м слой изолируется грунтом. Толщина промежуточной изоляции 0,25 м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимонин А. С. Инженерно-экологический справочник: в 3т. : учеб. пособие для вузов по специальностям : 32.07.00, 33.02.00 / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд. Н. Бочкаревой, 2003. Т.1. 917 с.; 2003. Т.2. 884 с.; 2003. Т.3. 1024 с.
2. Дерябин В. А. Анализ рассеивания вредных веществ промышленных выбросов в атмосфере : учеб. пособие / В. А. Дерябин. – Екатеринбург : УГТУ, 1997. 27 с.
3. Мазуров Д. Я. Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов / Д. Я. Мазуров. – М. : Стройиздат, 1975. 283 с.
4. Карюхина Т. А. Контроль качества воды / Т. А. Карюхина, И. Н. Чурбанова. – М. : Стройиздат, 1986. 160 с.
5. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. 386 с.
6. Стефаненко В. Т. Очистка от пыли газа и воздуха на коксохимических предприятиях / В. Т. Стефаненко. – М. : Metallurgiya, 1991. 72 с.
7. Иоффе И. П. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии / И. П. Иоффе. – Л. : Химия, 1991. 253 с.
8. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Л.: Химия, 1987. 576 с.
9. Юдашкин М. Л. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии/ М. Л. Юдашкин. – М. : Metallurgiya, 1984. 320 с.
10. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б. Ф. Зобнин [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1982. 360 с.
11. Лотош В. Е. Экология природопользования / В. Е. Лотош. – Екатеринбург : Полиграфист, 2001. 540 с.
12. Чистяков А. И. Технология коксохимических производств в задачах и вопросах / А. И. Чистяков. – М.: Metallurgiya, 1983. 296 с.
13. Родионов А. И. Техника защиты окружающей среды / А. И. Родионов, В. И. Клушин, Н. С. Торочешников. – М. : Химия, 1989. 540 с.
14. Харлампович Г. Д. Безотходные технологические процессы в химической промышленности / Г. Д. Харлампович, Р. И. Кудряшова. – М. : Химия, 1978. 210 с.
15. Бернардинер М. Н. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов / М. Н. Бернардинер, А. П. Шурыгин. – М. : Химия, 1990. 304 с.

16. Булатов А. М. Охрана окружающей среды в нефтегазовой промышленности / А. М. Булатов, П. П. Макаренко. – М. : Недра, 1997. 226 с.
17. Жуков А. И. Методы очистки производственных сточных вод : справочное пособие / А. И. Жуков, И. Л. Монгайт, И. Д. Родзиллер. – М. : Стройиздат, 1977. 204 с.
18. Ильичев В. Ю. Основы проектирования экобиозащитных систем : учеб. пособие для вузов / В. Ю. Ильичев, А. С. Гринин. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 207 с.
19. Яковлев С. В. Очистка производственных сточных вод / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин. – М. : Стройиздат, 1985. 335 с.
20. Кагасов В. М. Очистка сточных вод коксохимических предприятий / В. М. Кагасов, Е. К. Дербышева. – Екатеринбург : Полиграфист, 2002. 189 с.
21. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. – М. : Стройиздат, 1996. 186 с.
22. Санитарная очистка и уборка населенных мест : справочник / отв. ред. А. Н. Мирный. – М. : Стройиздат, 1985. 356 с.
23. Твердые промышленные и бытовые отходы, их свойства и переработка / А. А. Дрейер [и др.]. – М. : Стройиздат, 1997. 290 с.
24. Мягков М. И. Твердые бытовые отходы / М. И. Мягков, Г. И. Алексеев, В. А. Ольшанецкий. – Л. : Стройиздат, 1978. 206 с.
25. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. Минстрой России. – М. : ГУП ЦПП, 1996. 141 с.
26. СНиП 2.04.02-84\*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Минстрой России. – М. : ГУП ЦПП, 1996. 241 с.

*Учебное издание*

ТЕХНИКА ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Составители:

**Золотарева** Елена Геннадьевна  
**Глянченко** Владимир Дмитриевич

Редактор *О. С. Смирнова*

Компьютерный набор – *Е. Г. Золотарева*

Компьютерная верстка – *В. К. Матвеев*



Подписано в печать 04.03.2014. Формат 60×90 1/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Гарнитура Times New Roman.  
Усл. печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 50 экз. Заказ № 224.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел. + 7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел. + 7 (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс + 7 (343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru

